

Reconocimiento y evaluación de la calidad del Vidrio Metálico Dorado de Murano usado como revestimiento exterior con la técnica del *trencadís* en la arquitectura modernista catalana. Patrones de alteración y su efecto en la durabilidad.

TOMO I

Trabajo Final de Máster

Presentado por:

Héctor Yuldor Orozco Camargo

Dirigido por:

Dr. Arquitecto Joan Lluís Zamora i Mestre

Co-tutoría:

Dra. Arquitecto Júlia Gómez Ramió

Barcelona, octubre de 2019

Master universitario en Estudios Avanzados en Arquitectura-Barcelona (MBArch)
Especialidad en Innovación tecnológica en la arquitectura



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



Reconocimiento y evaluación de la calidad del Vidrio Metálico Dorado de Murano usado como revestimiento exterior con la técnica del *trencadís* en la arquitectura modernista catalana. Patrones de alteración y su efecto en la durabilidad.

TOMO I

Trabajo Final de Máster

Presentado por:

Héctor Yuldor Orozco Camargo

Dirigido por:

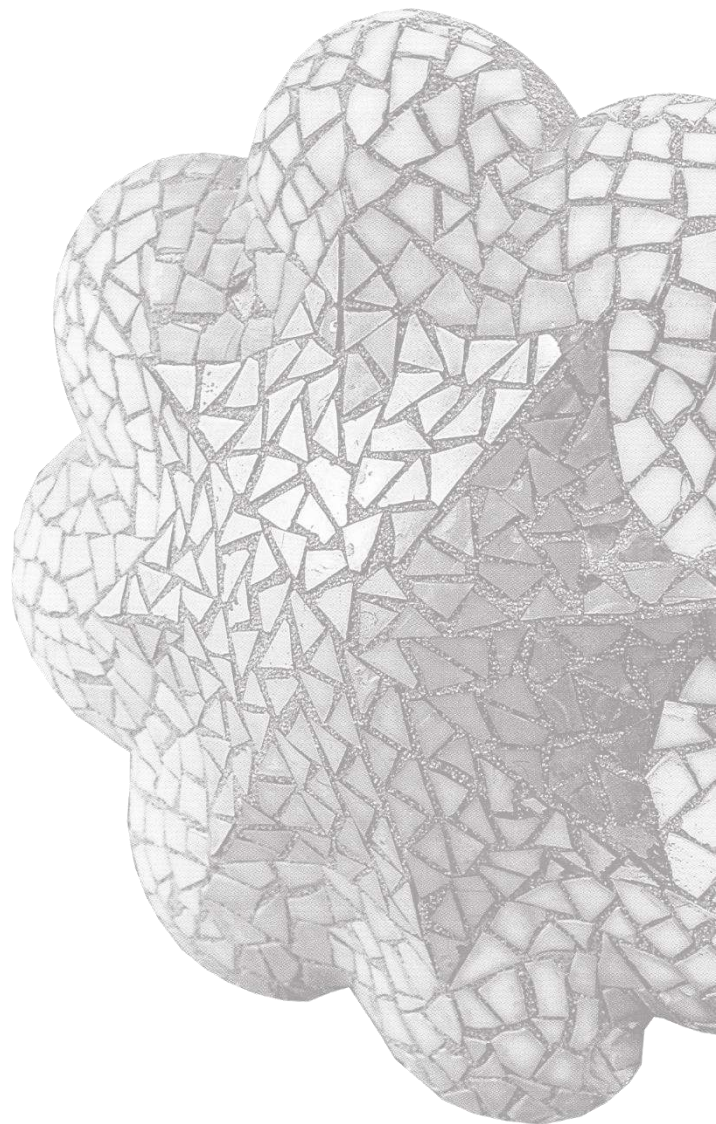
Dr. Arquitecto Joan Lluís Zamora i Mestre

Co-tutoría:

Dra. Arquitecto Júlia Gómez Ramió

Barcelona, octubre de 2019

Master universitario en Estudios Avanzados en Arquitectura-Barcelona (MBArch)
Especialidad en Innovación tecnológica en la arquitectura



Índice

TOMO I

1. Abstract	p.7
2. Resumen	p.8
3. Introducción	p.9
4. Objetivos	p.10
4.1. Objetivo General	p.10
4.2. Objetivos Específicos	p.10
5. Marco Teórico	p.12
5.1. El Material – El Vidrio	p.13
5.1.1. Propiedades del vidrio	p.16
5.1.2. Técnicas de Fabricación del vidrio	p.17
5.1.3. El vidrio en la Isla de Murano	p.18
5.1.4. Tipos de vidrio de Murano	p.20
5.1.5. La conservación del vidrio y las técnicas para su evaluación	p.21
5.2. La técnica – El <i>trencadís</i>	p.24
5.2.1. Antecedentes e historia de la técnica del <i>trencadís</i>	p.24
5.2.2. El <i>trencadís</i> en las obras de Gaudí	p.27
5.2.3. Proyectos singulares realizados con vidrio metálico dorado	p.29
5.3. La Obra – La Sagrada Familia	p.30
5.3.1. Principios utilizados en la composición de los pináculos de la Sagrada Familia	p.32
5.3.2. Partes del pináculo de San Bernabé	p.33
6. Desarrollo de la investigación	p.35
6.1. Análisis desde el material	p.36
6.1.1. Material proveniente de fábrica - análisis cualitativo	p.36
6.1.1.1. Detalles del material del estudio	p.37
6.1.1.2. Interpretación del proceso de fabricación del vidrio metálico dorado	p.38

6.1.1.3. Primera aproximación. Análisis visual (sin microscopio) y metodologías de análisis	p.43
6.1.1.4. Análisis visual - instrumental bajo microscopio	p.53
6.1.1.4.1. Anomalías entre capas o en la lámina de pan de oro	p.55
6.1.1.4.2. Anomalías en las caras exteriores de los vidrios de protección	p.65
6.1.2. <i>Piastrelle</i> sometidas a ensayos básicos de laboratorio	
- análisis cuantitativo	p.72
6.1.2.1. Ensayo para la determinación de la absorción de agua, porosidad abierta, densidad relativa y densidad aparente. UNE-EN ISO 10545-3:2018	p.75
6.1.2.2. Ensayo para determinar la resistencia a flexión y la carga de rotura. UNE-EN ISO 10545-4:2015	p.76
6.1.2.3. Ensayo para determinar la resistencia química. UNE-EN ISO 10545-13:2017	p.77
6.1.2.4. Ensayo para determinar la resistencia a las manchas. UNE-EN ISO 10545-14:2015	p.78
6.1.2.5. Ensayo para determinar la resistencia a choque térmico. UNE-EN ISO 10545-9:2013	p.79
6.1.2.6. Ensayo para determinar la resistencia a la abrasión superficial. UNE-EN ISO 10545-7:21999	p.80
6.1.2.7. Ensayo para determinar la resistencia al rayado según Mohs. UNE 67101:1985 y 67101/1M:1992	p.81
6.1.2.8. Ensayo para determinar la resistencia a la dilatación térmica lineal. UNE-EN ISO 10545-8:2014	p.82
6.1.2.9. Ensayo para determinar la resistencia a la helada. UNE-EN ISO 10545-12:1997	p.82
6.1.3. Ensayos a realizar en espejos plateados. Norma UNE-EN 1036	p.83
6.2. Análisis desde el laboratorio	p.84
6.2.1. Metodologías más comunes para la realización de experimentaciones	p.85
6.2.2. Patrones de deterioro obtenidos de los ensayos de laboratorio	p.89
6.2.2.1. Proceso de montaje y metodología para la valoración de las probetas sometidas a ensayos de laboratorio	p.89

6.2.2.1.1. Montaje de las probetas de <i>trencadís</i> con vidrio metálico dorado	p.91
6.2.2.1.2. Metodología para la valoración	p.97
6.2.2.2. Ensayos de envejecimiento acelerado en laboratorio	p.102
6.2.2.3. Recopilación de los patrones de anomalías de probetas sometidas a ensayos en laboratorio - análisis microscopio óptico	p.136
6.3. Análisis desde la Obra (Servicio – 100 años)	p.137
6.3.1. Patrones de colocación	p.138
6.3.1.1. El pináculo de San Bernabé	p.139
6.3.1.2. Taxonomía de clasificación para la valoración de los patrones de colocación	p.142
6.3.1.3. Anomalías en las teselas de <i>trencadís</i> de vidrio metálico dorado con más de 100 años de servicio	p.147
6.3.1.4. Comportamiento y características de los patrones de colocación en servicio	p.148
6.4. Resumen de las anomalías en los procesos del vidrio metálico dorado ...	p.150
7. Conclusiones	p.153
8. Futuras líneas de investigación	p.155
9. Bibliografía	p.156
10. Referencias Gráficas	p.159
11. Agradecimientos	p.168
TOMO II	
12. Fichas	p.2
13. Anexos	p.4

1. Abstract

Architecture has always used products and techniques that have been used initially in the decorative arts to enhance and enrich its formal geometric characteristics and as a cultural symbol.

The golden metallic glass mosaics, characteristic of the Byzantine era, are applied in the interior lining of walls and vaults due to their brightness characteristics and high light reflection. One of the most important moments of the golden metallic glass, will be the development of the technique by the glassmakers of the island of Murano in Venice and its application in the basilica of San Marcos in Venice, where the *piastrelle* (denomination of the tiles of small dimensions in Italian), they begin to leave the interior spaces to cover transition zones like the cloths of the access arches to the basilica. This moment is fundamental because, the golden metallic glass goes from being an inner lining product to lining outer surfaces.

The uniqueness of the golden metallic glass will be interpreted by Gaudí who will take it outside completely, to cover its complex geometries, as is the case of the pinnacles of the Sagrada Familia towers through the proven Catalan mosaic technique, the *trencadís*.

This change of location abroad will entail a significant alteration of its durability, without currently having references or parameters to characterize it, know it and, if it were the case, to prevent or modify it. To study the durability of this product in outdoor conditions, it is necessary to know the nature of the different deterioration processes.

In this study, various research campaigns are collected and different non-destructive image recognition techniques are applied, such as digital photography, flatbed scanning, optical digital microscope, among others, in order to identify and catalog the different anomalies that they are manifested, either in the manufacture of the product itself, either during handling and commissioning or throughout the years in its service position.

This more extensive and intense knowledge of the behavior of golden metallic glass can be a first step for its future improvement, conservation and protection

2. Resumen

La arquitectura se ha servido siempre de productos y técnicas que se han utilizado inicialmente en las artes decorativas para potenciar y enriquecer sus características geométricas formales y como símbolo cultural.

Los mosaicos de vidrio metálico dorado, característicos de la época bizantina, se aplican en el recubrimiento interior de paredes y bóvedas por sus características de brillo y alta reflexión de la luz. Uno de los momentos más importantes del vidrio metálico dorado será el desarrollo de la técnica por parte de los vidrieros de la isla de Murano en Venecia y su aplicación en la basílica de San Marcos en Venecia, en donde las *piastrelle* (denominación de las piastras de pequeñas dimensiones en italiano) empiezan a salir de los espacios interiores para revestir zonas de transición como los paños de los arcos de acceso a la basílica. Este momento es fundamental porque el vidrio metálico dorado pasa de ser un producto de revestimiento interior a revestir superficies exteriores.

La singularidad del vidrio metálico dorado la interpretará Gaudí, quien lo llevará al exterior completamente, para revestir sus geometrías complejas, como es el caso de los pináculos de las torres de la Sagrada Familia a través de la acreditada técnica de mosaico catalán, el *trencadís*.

Este cambio de localización al exterior conllevará una alteración notable de su durabilidad sin que se disponga actualmente de referencias o parámetros para caracterizarla, conocerla y, si fuera el caso, prevenirla o modificarla. Para estudiar la durabilidad de este producto en condiciones exteriores, es necesario conocer la naturaleza de los diferentes procesos de deterioro.

En este estudio se recopilan diversas campañas de investigación y sobre ellas se aplican diferentes técnicas no destructivas de reconocimiento de imagen como la fotografía digital, el escáner plano y el microscopio digital óptico, entre otros, con el fin de identificar y catalogar las diferentes anomalías que se manifiestan, bien en la propia fabricación del producto, bien durante su manipulación y puesta en obra o bien a lo largo de los años en su posición de servicio.

Este conocimiento más extenso e intenso del comportamiento del vidrio metálico dorado puede ser un primer paso para su futura mejora, conservación y protección.

3. Introducción

Al hablar de arquitectura catalana, lo primero que se nos viene a la mente es la imagen de la basílica de la Sagrada Familia. Y no es para menos, pues además de ser la obra más reconocida de Gaudí, es un proyecto que reúne todos los conceptos de esta corriente arquitectónica.

Desde el inicio de su proyección, Gaudí tenía claro que se trataba de una obra cuya construcción se prolongaría en los años, por lo que es el mejor ejemplo de la aplicación de diferentes tecnologías, técnicas y materiales a través del tiempo.

El perfil de la ciudad de Barcelona no puede ser recordado sin los picos sobresalientes en una composición urbana caracterizada por la horizontalidad determinada por el ensanche de las calles del plan Cerdá. Uno de estos picos, corresponden a las torres de la Sagrada Familia en cuyos pináculos, elementos de remate, alberga la utilización de un revestimiento muy especial, usado durante años en espacios interiores de grandes construcciones religiosas bizantinas con el fin de crear atmósferas cargadas de simbolismo, luz y belleza.

Gaudí entendió las características del revestimiento en los espacios interiores, pero no se conformó con utilizarlo de la misma manera, sino que le dio una nueva aplicación en el exterior. Aprovechando las propiedades mecánicas y ópticas tan especiales del vidrio metálico dorado, Gaudí decide sacarlo de los espacios interiores y lo utiliza como revestimiento exterior. Además, le da un nuevo tratamiento mediante una técnica que se convirtió en una representación de las tradiciones locales desarrollada con la idea de adaptar el revestimiento a las nuevas formas sinuosas de la arquitectura gaudiana. Estamos hablando de las teselas de vidrio metálico dorado y de la técnica del *trencadís*. Llegados a este punto, tenemos los tres elementos básicos que se desarrollarán en los diferentes capítulos de la investigación: el vidrio metálico dorado como producto, el *trencadís* como técnica y los pináculos de la Sagrada Familia como la obra de aplicación.

El principal problema al cual se tendrá que enfrentar el producto vidrio metálico dorado en su nueva aplicación como revestimiento exterior, al haberse pensado originalmente como un elemento para uso en espacios interiores, será su durabilidad frente a las acciones de los fenómenos ambientales. Para poder llegar a determinar las condiciones de su durabilidad y las mejores técnicas para gestionar el comportamiento de cualquier producto se debe analizar, paso a paso, la presencia y la evolución de las diferentes anomalías en la vida de las teselas de vidrio metálico dorado.

El análisis abarcará, por un lado, el estudio del vidrio metálico dorado desde el momento de su producción en las fábricas venecianas pasando por el transporte, la manipulación (corte con cizalla, almacenaje y retoque final con tenazas en obra) y el montaje en obra. Por otro lado, se estudiarán los ensayos de laboratorio de envejecimiento acelerado realizado hasta el momento, indispensables a la hora de valorar el comportamiento del material a futuro y determinar posibles situaciones y métodos de actuación. Finalmente, se realizará una valoración del comportamiento de las teselas de *trencadís* sujetas a situaciones reales, mediante su exposición a casi cien años en el pináculo de San Bernabé de la Sagrada Familia, gracias a los reportajes gráficos disponibles en este momento.

4. Objetivos

El vidrio metálico dorado producido en Murano se halla en la categoría de los productos artesanos, pero con un gran potencial de uso en la arquitectura. Para usar adecuadamente este producto en nuevas obras y mantener el ya existente en las mejores condiciones, debemos conocer mejor sus características estáticas (iniciales) y, al mismo tiempo, sus características dinámicas (evolución a lo largo del tiempo en las condiciones de una obra).

4.1 Objetivo General

Disponer de un fondo de conocimiento que permita evaluar en cada etapa de su vida la calidad del vidrio metálico dorado de Murano usado como revestimiento exterior con la técnica del trencadís en la arquitectura modernista catalana y que permita gestionar adecuadamente su durabilidad.

4.2 Objetivos Específicos

- Realizar una valoración cualitativa y cuantitativa del estado de alteración de las teselas de vidrio metálico dorado en cada etapa del proceso.
- Catalogar las diferentes anomalías que se puedan presentar en las diversas etapas de la vida del vidrio metálico dorado.
- Relacionar esta valoración con las expectativas de durabilidad límite, con respecto a su apariencia.
- Identificar los fenómenos principales que influyen en el deterioro de las teselas de vidrio metálico dorado con el fin de controlar a priori o a posteriori dichos fenómenos.
- Aplicar el conocimiento adquirido a la mejora continuada de los procesos de fabricación, puesta en obra y mantenimiento de este producto.
- Establecer procesos de medición de los parámetros de durabilidad para su aplicación in situ o en ensayos de laboratorio.



5. Marco Teórico

5.1. El material – El vidrio

El vidrio es un elemento con una estructura amorfa compuesto por sílice (SiO_2)¹ y otros óxidos metálicos que son mezclados a altas temperaturas (alrededor de los 1000°C hasta llegar a su fusión²) y con un enfriado rápido con el fin de evitar que las moléculas se organicen y se cristalicen. La solidificación se produce a medida que la temperatura va disminuyendo y de acuerdo a los componentes que están en fusión. Dependiendo del tipo de vidrio que se quiera obtener, se deben seleccionar los materiales de acuerdo a su proceso de solidificación, ya que, en el caso de querer realizar objetos decorativos, es necesario que sea de lenta solidificación. Al darse un proceso lento de solidificación, la maleabilidad y la elaboración del vidrio se facilita, pero como consecuencia, al hacer contacto con la humedad, la superficie se torna opaca.

Los materiales estabilizantes permiten disminuir la opacidad, pero, además, estabiliza la acción de la humedad en la superficie del vidrio. Algunos compuestos añadidos cumplen una función afinante, lo que permite el desprendimiento de las burbujas de fundido y mejora la homogeneidad del vidrio.

La homogeneidad y la transparencia se logran con las altas temperaturas de fusión.

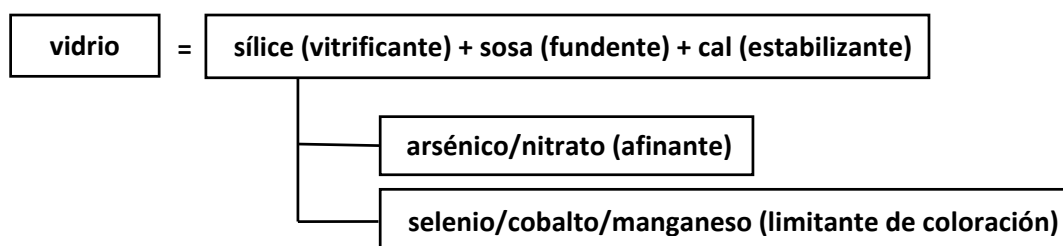


Figura 1.1 Composición básica de un vidrio

Elementos	Sódico—cálcico	Plomo	Borosilicato	Sílice
Sílice	70-75	53-68	73-82	96
Sodio	12-18	5-10	3-10	
Potasio	0-1	1-10	0.4-1	
Calcio	5-14	0-6	0-1	
Plomo		15-40	0-10	
Boro			5-20	3-4
Aluminio	0.5-3	0-2	2-3	
Magnesio	0-4			

Figura 1.2 Composición de los vidrios comerciales más comunes

¹ Aproximadamente el 70% del peso es de arena sílicea. La sílice solo se funde a 1700°C

² 1400°C para el vidrio de Murano

En Murano, a partir de la invención del cristal³, se fabrican básicamente tres tipos de vidrio: vidrios comunes, cristal y vidrio de plomo. El vidrio común y el cristal son vidrios formados básicamente por sílice y sosa, y se emplean para la realización de objetos en general; mientras, el vidrio de plomo es usado para la producción de esmaltes y de varillas por su bajo punto de fusión.

A partir de diferentes investigaciones se ha constatado que, en origen, el fundente de los vidrios de Murano es sódico, ya que se obtenía de cenizas vegetales orientales sódicas. La sílice se obtiene de los gujarros, pero a partir del siglo XVIII se van a utilizar arenas orientales para la producción de objetos.

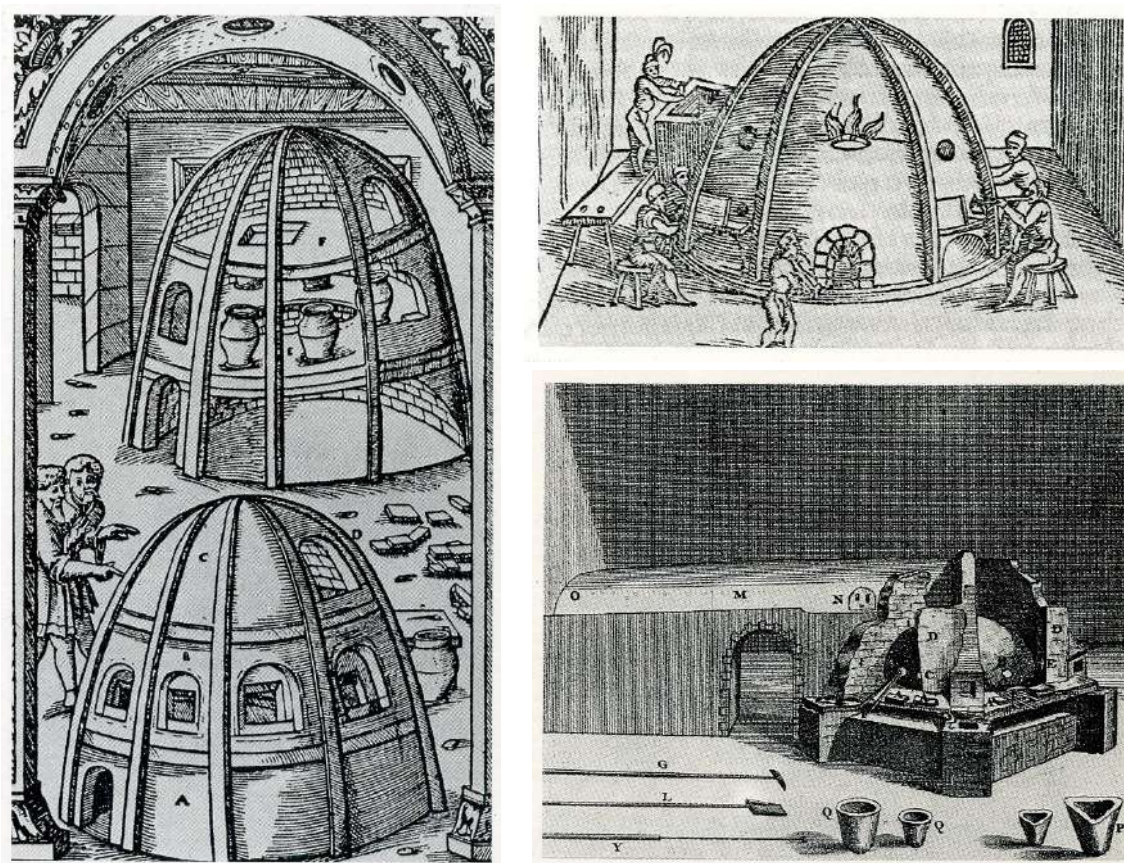


Figura 1.3 Transformación del horno de fundición para la fabricación del vidrio
Izq. Horno de tres pisos, Der. Arriba. Horno de tres pisos, Der. Abajo. Horno de tres pisos y recocado

La técnica y los componentes han cambiado muy poco desde sus orígenes. Sin embargo, la tecnología ha permitido, principalmente, mejorar los procesos y los tiempos. El empleo actual de hornos a base de gas y de mayor capacidad permite el aumento de las temperaturas, lo que reduce el tiempo de fusión. Por supuesto, no siempre fue así. En los orígenes de la fabricación del vidrio de Murano, el vidrio se fabricaba con un horno calentado a base de leña en donde se realizaba, primeramente, el proceso de la *fritta*. Esta consistía en mezclar gujarros fragmentados y cenizas para ponerlos después en un horno a una temperatura de 700°C por algunos días o incluso semanas.

³ Año 1450 por Angelo Barovier

Hasta el siglo XVII el horno estaba compuesto por una estructura circular de tres pisos con varias bocas. En el primer piso se quemaba la leña, en el segundo se ubicaban los crisoles y en el último se colocaban los objetos para el enfriado. Posterior a este periodo y hasta el siglo XIX, el horno sufrió un agregado para el recocido. Esta nueva estructura era más alta que el horno y pasaba por encima de este, el cual tenía un óculo que dejaba pasar el humo hacia la zona del recocido. A partir de aquí, la leña se dispuso sobre parillas con el fin de mejorar la combustión. Ya en el siglo XX las dos estructuras se separan y se empieza a emplear el gas como combustible.

Antes de profundizar en los métodos y técnicas para el estudio del vidrio, hay que aclarar dos elementos que se suelen confundir: vidrio y cristal. En rasgos generales, los componentes de ambos son los mismos, pero el cristal posee un elemento añadido que es el que le confiere sus características: el óxido de plomo⁴. El lento proceso de enfriado y la característica de la estructura regular de la distribución de los átomos de óxido de plomo son los dos factores principales que producen el cambio entre el vidrio⁵ y el cristal.

La creación del vidrio se remonta al siglo I a.C., mientras que el cristal data de épocas medievales y su desarrollo tuvo lugar en la República de Venecia gracias a Angelo Barovier en el siglo XIV. La invención de este elemento surge a raíz de la contaminación de cenizas sódicas que poseían las aguas del Mediterráneo para la fabricación del vidrio. Barovier, realiza diferentes operaciones para poder depurar el material y, sumado a la utilización del cuarzo del río Ticino y al uso del bióxido de manganeso como material decolorante, logra organizar la estructura atómica del vidrio y crea el cristal.

La utilización del cuarzo, de estructura cristalina, es la base para la fabricación del cristal. Los elementos con estructura cristalina son más duros y de ahí que se prefieran utilizar a la hora de fabricar vidrios soplados además del aumento de brillo gracias a sus características.

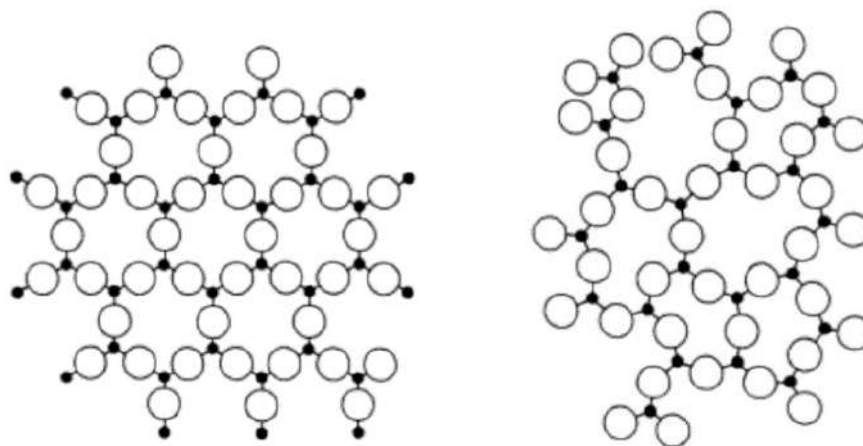


Figura 1.4 Estructura molecular de un cristal y de un vidrio con la misma composición.
Izq. Cristal, Der. Vidrio

⁴ También se suele usar en ocasiones el óxido de bario

⁵ Algunos vidrios pueden contener algún porcentaje de plomo para proporcionar más brillo. El porcentaje de plomo de ser <24% según www.tesauros.mecd.es.

5.1.1. Propiedades del vidrio

El vidrio posee diferentes propiedades que son determinadas por tres factores principalmente: los componentes químicos de la estructura molecular y atómica, la temperatura y los fenómenos atmosféricos. El primer factor es el condicionante químico que provoca las diferentes reacciones dentro de la composición del elemento. Cada tipo de vidrio tiene una especialidad y una función específica, por lo cual su composición varía de acuerdo a la finalidad deseada. Por su parte, la temperatura es la encargada de crear las reacciones físicas en el comportamiento de los componentes del vidrio en sus diferentes etapas de fabricación para generar las características y efectos físicos que se quieren obtener en él. Por último, los fenómenos atmosféricos condicionan las diferentes reacciones físicas y químicas de la estructura del vidrio, ya que son fuerzas externas a los componentes del vidrio.

De los tres factores, dos de ellos pueden ser manipulados por el hombre de acuerdo con las características que se quieran conseguir en el vidrio. El tercero no es posible manipularlo, pero al modificar las condiciones de los dos anteriores se logra reducir el efecto de este. A lo largo del tiempo, la composición química no ha sufrido muchas variaciones; los efectos físicos son siempre los mismos y, quizás, las condiciones atmosféricas son las únicas que podrían generar un gran cambio.

Es por estas razones que el vidrio siempre tendrá las mismas propiedades, las cuales son las siguientes:

- a. **Templado.** El templado es la mejora de las propiedades del vidrio en un estado de compresión permanente. Se logra mediante el cambio de temperatura de un calentamiento controlado a un rápido enfriado.
- b. **Viscosidad.** La viscosidad es una característica de los fluidos en donde se presenta la resistencia de estos al fluir. Es la resistencia a las tensiones generadas por la tracción y por el corte.
- c. **Térmicas.** Las propiedades térmicas dependen de la viscosidad del vidrio. Se pueden diferenciar 4 fases de acuerdo con esta. La primera fase se denomina “punto de trabajo” y es en donde la viscosidad del vidrio es baja, por lo que no puede dársele forma. La segunda se denomina punto de reblandecimiento. En esta fase, el vidrio empieza a deformarse de una manera notable. En el punto de recocido, que es la tercera fase, las tensiones internas desaparecen gracias a la temperatura. Y, por último, el punto de deformación.
- d. **Densidad.** Es la concentración de las partículas y depende de la temperatura, la presión y la composición del vidrio.
- e. **Elasticidad.** La elasticidad es la capacidad de volver al estado inicial después de la aplicación de una fuerza. Cuando las moléculas de un vidrio son separadas por algún esfuerzo, la atracción de estas las vuelve a llevar a su posición inicial.
- f. **Compresibilidad.** Es la acción de reducir de volumen un material.
- g. **Durabilidad química.** La durabilidad química es la resistencia del vidrio al ponerlo en contacto con diferentes soluciones acuosas o agentes atmosféricos.
- h. **Eléctricas.** La conductividad eléctrica depende de la composición del vidrio, de la temperatura a la cual se encuentre este último y de las condiciones atmosféricas del entorno.

5.1.2. Técnicas de fabricación del vidrio

La fabricación del vidrio tampoco ha tenido demasiadas variaciones desde sus inicios. Cualquier técnica de fabricación, se basa en someter al calentamiento los diferentes minerales y óxidos metálicos mediante un horno a altas temperaturas. Es algo obvio pues el estado físico del paso de estos materiales de sólido a líquido se logra mediante la fusión, aumentando la temperatura. Lo que en cambio ha dado diferentes características al vidrio son sus métodos de acabado mediante la combinación de diversas técnicas y materiales. Dentro de las diferentes técnicas de fabricación a lo largo del tiempo, se pueden nombrar:

- a. **Moldeado por núcleo.** Es una técnica de la antigüedad que consistía en la realización de pequeños elementos de cristal, como vasijas, en torno a un núcleo central; de ahí su nombre. Este núcleo, hecho por fiemo de animal y arcilla, se modelaba con la forma deseada y, luego, se introducía en el vidrio fundido que estaba depositado en el horno. El modelado era realizado sujeto a una varilla para permitir el manejo al introducirlo en el horno. La varilla se giraba con el fin de que quedara con el mismo espesor por todos los lados. Posteriormente se secaba, se dejaba enfriar y se retiraba el molde obteniendo así los objetos de vidrio finales.
- b. **Vaciado con molde.** El vaciado con molde fue un método utilizado hasta la época del Imperio romano para la fabricación de objetos como joyas, vajillas, etc. Consistía en el vertido del vidrio caliente en un molde. Existían dos maneras de realizarlo; en un molde abierto en donde simplemente se depositaban los materiales para la fabricación del vidrio y luego se llevaba al horno, o mediante el uso de dos moldes que se rellenaban con el material fundido. Se dejaba enfriar y, posteriormente, se retiraba del molde.
- c. **Vidrio soplado.** Es una de las técnicas más usadas desde la antigüedad hasta nuestros días. El proceso se inicia con la extracción de material fundente del interior del horno con una varilla hueca que se va girando continuamente para conseguir una cantidad uniforme. Tras ello, se retira del horno y se coloca sobre una superficie en donde se continúa girando con el fin de obtener un volumen cilíndrico el cual posteriormente es soplado hasta obtener la burbuja deseada.
- d. **Vidrio moldeado.** Es una técnica que consistía en soplar el vidrio fundido que se encontraba dentro de unos moldes que tenían la forma y el diseño deseado. Se dejaba enfriar el material fundente que pasaba a estado sólido y posteriormente se retiraban los moldes y se obtenía el objeto finalizado. Es una técnica que se utilizó en la antigüedad y en los siglos XVIII y XIX.
- e. **Prensado en molde.** Como su nombre sugiere, se trata de una técnica que consiste en el vertido del material fundido en unos moldes con el diseño deseado; luego es prensado mediante un contra molde. Esta técnica se empezó a utilizar en los primeros años del siglo XIX en Estados Unidos y seguidamente se expandió.

A pesar de las diferentes técnicas para la fabricación del vidrio, los procesos son siempre los mismos: materiales fundidos en horno, enfriados y terminados. Los materiales se fusionan para pasar de un estado sólido a uno líquido para nuevamente volver a un estado sólido con diferentes características gracias a la mezcla de los componentes.

5.1.3. El vidrio en la Isla de Murano



Figura 1.5 Venecia y la Isla de Murano

El vidrio de Murano es conocido mundialmente debido a la creatividad artística del diseño de sus productos, a la producción en donde el proceso tradicional se ha conservado por siglos y a la venta de vidrio único y de gran calidad como sistema de publicidad. Sin embargo, para llegar a tener la fama internacional que tiene hoy, el vidrio de Murano⁶ ha debido de pasar por diferentes procesos, transformaciones, momentos de declive y de esplendor.

La permanencia de la importancia al paso de los siglos del vidrio de Murano se debe principalmente al hecho de que Venecia se mantuvo siempre como una ciudad mercantil y comercial que no entró a formar parte de la organización feudal del Imperio Carolingio. La ventaja de su localización como punto de conexión entre Oriente y Occidente le confirieron la importancia de puerto mercantil en la entrada de Europa. El intercambio que se generó no fue solamente en términos comerciales, sino que, además, ocurrieron mezclas de tradiciones culturales, de técnicas, etc. Es en este momento cuando la actividad vidriera veneciana adquiere los avances y conocimientos de las técnicas desarrolladas en Oriente, técnicas que van a formar su base y el punto de partida desde donde van a desarrollar y a lograr su fama internacional como vidrieros.

El vidrio veneciano en sus orígenes va a ser un elemento proveniente de cenizas sódicas de la combustión de material del litoral mediterráneo y sílice obtenido de las arenas de los ríos. Como la naturaleza propia del vidrio resulta ser de un tono verde (debido principalmente al óxido férrico⁷), se decide agregar bióxido de manganeso como limitante de este color y otras sustancias que le confieren una composición más azulada.

⁶ Cuando se habla de vidrio de Murano en términos históricos se incluye a los artesanos que lo trabajan

⁷ Para evitar que el vidrio salga verde azulado, el vidrio debe tener un porcentaje menor al 0.01% de óxido férrico

El nombre de *vidrio de Murano*, se debe a que los vidrieros del Reino de Venecia, por temor a los incendios de las estructuras de madera, fueron trasladados a la Isla de Murano donde, a partir de ese momento, se desarrolló y potenció su actividad.

El vidrio es uno de los inventos más sorprendentes e importantes dentro de la historia de la humanidad. Tanto es así que la revolución tecnológica del vidrio de 1450 marca el final del Medievo y el inicio del Renacimiento. El siglo XVI es el siglo de máximo esplendor para el vidrio de Murano. Muchos de los maestros vidrieros y sus creaciones obtienen beneficios y se mezclan con las personas más influyentes de la época. Los gobernantes, al ver este crecimiento y desarrollo, van a temer que las técnicas de los vidrieros sean exportadas y reproducidas, lo cual generaría un declive en el desarrollo del reino, por lo cual, en los dos siglos siguientes (XVI y XVII) se crearán medidas de protección en donde se prohíbe la exportación de dichas técnicas y solo estará permitido desarrollar la actividad de vidriero a los ciudadanos de Murano. Pese a estas leyes, la mayoría de los vidrieros, con el afán de crecer, emigran a diferentes países europeos como Francia, Holanda o Inglaterra, en donde van a desarrollar sus diferentes técnicas.

El esplendor del siglo XVI continúa en el siglo XVII cuando se desarrollan diferentes métodos creativos y técnicos, lo que llevará a Antonio Neri a crear el primer manual del vidrio denominado: *L'arte vetraria*. Como en la mayoría de procesos, después del esplendor llega el declive y la crisis, y el sector vidriero de Murano no va a ser una excepción. El siglo XVIII es uno de los periodos de mayor crisis para el vidrio de Murano debido principalmente a la competencia internacional: Inglaterra se convierte en su rival principal con la fabricación de un vidrio grueso y brillante que se puso de moda. Pero la competencia internacional no logró reproducir algunas de las técnicas que llevaban siglos de desarrollo, como es el caso de la *calcedonia*, la *venturina* y el *lattimo*. La producción de espejos y la de vidrio coloreado, gracias a la especialidad de los vidrieros venecianos, no fueron afectadas por la crisis.

Pese a la permanencia de algunas de sus técnicas, el vidrio soplado, (el método que va a dar la fama a Murano), había casi desaparecido y no se va a recuperar hasta mediados del siglo XIX con la reaparición de la *filigrana*. Poco a poco, el vidrio de Murano vuelve a coger fama y maestros como Lorenzo Radi redescubren los componentes de la *calcedonia* y realizan pastas de vidrio para la fabricación de mosaicos que serán aplicados a obras tan importantes como la restauración de algunas piezas de la Basílica de San Marcos. Ya con la inclusión de la República de Venecia al nuevo Reino independiente de Italia (1861), por iniciativa del alcalde de Murano y del abad Vincenzo Zanetti se funda el Museo del vidrio y la Escuela de Diseño para vidrieros.

Un momento importante en la producción y el desarrollo de la técnica del vidrio de Murano va a ser la llevada de la mano de Antonio Salviati, quien crea la fábrica *Salvati & C.*, una de las mayores fábricas de Murano, con los mejores maestros vidrieros y de mucha fama internacional. Posteriormente, va a desaparecer y se va a llamar *The Venice and Murano Glass and Mosaic Company*, la cual se disolverá para crear *Salvati y Barovieri* y la *Compagnia di Venezia e Murano*. En este periodo se recuperan la técnica de los esmaltes al fuego y la decoración con hoja de oro.

La primera mitad del siglo XX se caracteriza por el desarrollo del diseño industrial en la tecnología del vidrio, en donde la corriente del *Novecento* determina la funcionalidad y las líneas simples en las composiciones artísticas.

Hoy en día, Murano continúa teniendo gran fama internacional y a pesar de mantener la producción artesanal del vidrio, realiza investigaciones para mejorar su calidad, crear nuevos diseños y técnicas.

5.1.4 Tipos de vidrio de Murano más representativos

Como ya se ha tratado en el apartado anterior, el vidrio de Murano adquirió fama a partir de la singularidad y de la calidad de sus vidrios. Empresas fabricantes como *Salviati & C.*, van a ser de suma importancia para la conservación y la exportación de las diferentes técnicas a partir de la segunda mitad del siglo XIX.

Tipos de vidrio como el *avventurina*, *calcedonio*, *filigrana*, *granzioli*, *vetro a cammeo*, *corinto*, *vetro a fiamma*, *vetro a fondo oro*, *granito*, *murrina*, *opale*, *vetro a piume*, *smalto*, *vetro a ghiaccio* y técnicas como el *incamiciato*, el *soffiato* o el *inclamo*⁸, retoman su fama debido a la producción de diferentes objetos fabricados por la fábrica *Salviati & C.* Aunque el principal sector de la fama del vidrio de Murano es la producción de objetos como elementos de decoración, piezas de uso doméstico y joyería, entre otros, el sector de la arquitectura también ha sido revestido por este tipo de vidrios. Dos de los más comunes, sobre todo en la arquitectura catalana de la época modernista que corresponde casi con la creación de la fábrica de *Salviati*, son el vidrio *smalti* y el vidrio *metallico*.

Aunque estos elementos ya se han utilizado previamente en otras obras, incluso desde época bizantina, en la arquitectura del modernismo catalán van a utilizarse como elementos de revestimiento singulares aplicados a la técnica del *trencadís* especialmente en las obras del arquitecto Antoni Gaudí. Los dos tipos de vidrio, son importados directamente desde la Isla de Murano debido a la calidad, tradición y experiencia de su fabricación. El *smalto*, es un vidrio que se va a utilizar mucho en la arquitectura gaudiana debido a la posibilidad de composición con múltiples colores. Por otro lado, el vidrio *metallico*, un vidrio caro y de poca aplicación, se va a utilizar en elementos singulares en donde se busca aprovechar al máximo las características de brillo y resistencia del material.

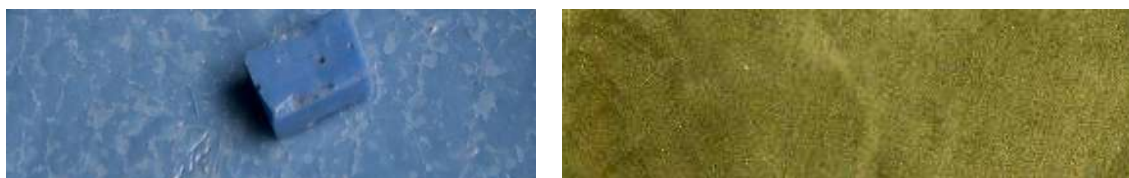


Figura 1.6 Vidrio *Smalti* y *Metallico* de ORSONI

A partir del resurgimiento de la tradición vidriera de la Isla de Murano, junto a las empresas nombradas precedentemente, se van a crear muchas otras fábricas especializadas en determinados tipos de vidrio⁹. En el sector del vidrio *smalto* y *metallico*, la fábrica de Angelo Orsoni va a ser una de las de más renombre a partir del año de su fundación¹⁰. Su fama la adquiere debido a la *libreria del colore*, con 3500 tonalidades diferentes de *smalti*, expuestas en la exposición universal de París de 1889¹¹, que se van a utilizar para crear diferentes y actualizados mosaicos alrededor del mundo. El vidrio *metallico* de ORSONI también ha adquirido fama mundial por la calidad de sus acabados, pero, sobre todo, por el tratamiento que se le da a los materiales metálicos y a la fundición con los dos vidrios de protección que le componen. Dentro del vidrio *metallico* se pueden obtener diferentes tipos de acuerdo a la lámina de metal que se ha empleado para su fabricación. Las láminas de metales más usadas son las de oro, plata y cobre, de ahí que el vidrio *metallico* sea un elemento particular y costoso.

⁸ Ver detalles del grupo de fichas FTVM

⁹ Para ver más empresas ir al documento *Vetriere di Murano* en los anexos

¹⁰ Año de fundación de ORSONI: 1888

¹¹ Información tomada de la página web de ORSONI

5.1.5. La conservación del vidrio y las técnicas para su evaluación

Para poder aplicar diferentes técnicas para la evaluación de la calidad y el estado del vidrio, es necesario primero entender su comportamiento y la causa de sus anomalías. El deterioro principal que se produce en el vidrio es la corrosión. El origen de esta reacción química, se puede estudiar mediante un procedimiento tan simple como la aplicación de soluciones acuosas con diferentes valores pH sobre la superficie del vidrio. Para poder realizar un correcto análisis, se deben utilizar tres soluciones diferentes como mínimo: una ácida, una neutra y una base.

Algunas de las soluciones acuosas que no modifican la estructura de la composición química del vidrio, normalmente crean una película de gel sobre la superficie.

La degradación de la superficie del vidrio, debido a la interacción con la atmósfera, se conoce como meteorización. Dependiendo de la cantidad de agua condensada en la superficie, este proceso puede ser dominado por un ataque ácido o alcalino. Si una gota de agua permanece en la superficie, la desalación del vidrio ocurre con un aumento simultáneo del pH del agua. Si la relación entre la superficie y el volumen de la solución es alta, puede producirse una disolución local del vidrio. Dependiendo de las condiciones externas, estas gotas pueden desplazarse de forma natural, llevando consigo los productos de la reacción. Si se produce la evaporación de la humedad antes de que se formen las gotas, los productos de la reacción permanecen en la superficie del vidrio, listos para reaccionar con gases ácidos como CO_2 o SO_2 para formar sus sales. (Römich, 1999)

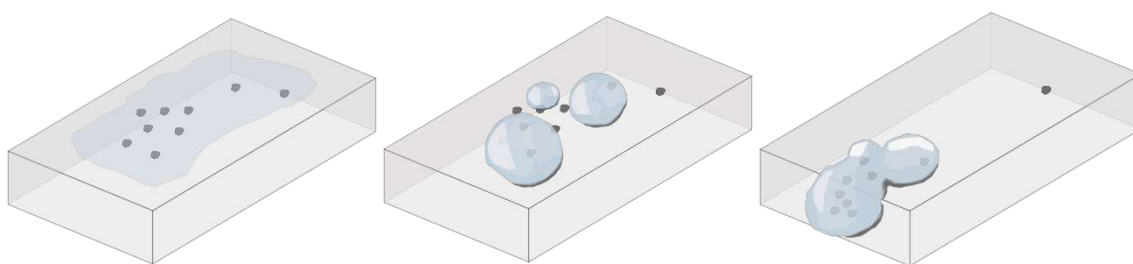


Figura 1.7 Condensación de agua sobre la superficie – desplazamiento de gotas

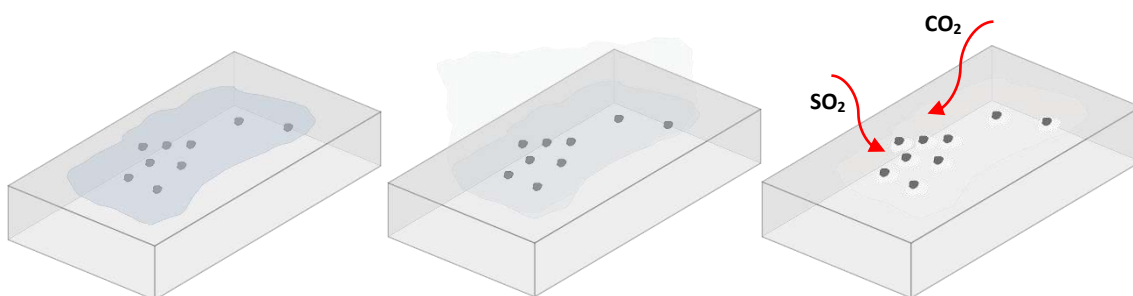


Figura 1.8 Condensación de agua sobre la superficie – evaporación de la humedad

Nuevamente, vale la pena recordar que las características y el comportamiento del vidrio no solo dependen de la composición química del elemento, sino que también influyen factores como los procesos térmicos a los cuales ha sido sometido a lo largo del tiempo, la homogeneidad de su estructura, la rugosidad de la superficie o cualquier intervención que haya sufrido. Factores ambientales como la temperatura, el tiempo de exposición, el nivel de ataque, la humedad relativa y la presencia de agentes contaminantes afectan también la durabilidad del vidrio.

Los vidrios históricos que están expuestos a la intemperie son de especial cuidado, ya que, al estar en contacto directo con diferentes fenómenos ambientales, a través del tiempo, han podido haber experimentado diferentes modificaciones debido a las variaciones que se van produciendo con el pasar de los años. Son tres los principales fenómenos ambientales que influyen en el deterioro de los vidrios que están expuestos a la intemperie: la lluvia, la humedad y los diferentes agentes contaminantes. El proceso de corrosión genera diferentes fenómenos en las capas superficiales de los vidrios. Uno de ellos es el denominado *crizzling*¹², en donde la transparencia del vidrio se ve afectada por la aparición de pequeñas grietas. También se producen fenómenos ópticos como la iridiscencia debido al decapado progresivo de las capas de la superficie del vidrio. Todas estas condiciones son aplicables a cualquier tipo de vidrio, ya que el comportamiento frente a los fenómenos mencionados será siempre el mismo, aunque con variaciones que dependen sobre todo de los cambios del medio ambiente.

Además de conocer los diferentes mecanismos de deterioro del vidrio, es importante saber con qué medios y métodos se cuenta para su estudio. Todo esto con el fin de poder saber la composición y las características del material para poder emprender una acción de prevención, conservación o restauración del elemento. Si un vidrio da como resultados del estudio proporciones altas de $(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ tendrá mayor estabilidad; un vidrio con un alto contenido de álcalis y bajo contenido de cal (CaO) puede mostrar formas extremas de deterioro (Mass, 1999).

Las diferentes técnicas de las que se disponen ayudan, principalmente, a la identificación de la composición química de la superficie del vidrio, a conocer los estados de oxidación de los iones metálicos, a identificar compuestos cristalinos y partículas que no se han disuelto o que causan algún tipo de reacción.

Las diferentes técnicas para el análisis del vidrio se pueden dividir en seis grandes grupos de acuerdo con el método con el cual se evalúan los diferentes elementos. Los grupos y las técnicas son¹³:

a. Métodos de haz de electrones / Electro beam methods

- a1. Microscopía electrónica de barrido / Scanning electron microscopy (SEM)
- a2. Espectrometría de rayos X por dispersión de energía / Energy dispersive X-ray spectrometry (EDS)
- a3. Microanálisis por sonda de electrones / Electron Probe microanalysis (EPMA)
- a4. Espectrometría de emisión de Auger / Auger emission spectrometry

b. Métodos de rayos X / X-ray methods

- b1. Difracción de rayos X / X-ray diffraction (XRD)

¹² Defecto básico en vidrio causado por una proporción imperfecta de ingredientes, particularmente un exceso de álcali consistente en una red fina de fisuras y la formación de humedad en la superficie

¹³ Para ver las características de cada método ir a las fichas FMA

- b2. Espectrometría de fotoelectrones de rayos X / X-ray photoelectron spectrometry (XPS)
- b3. Fluorescencia de rayos X / X-ray fluorescence (XRF)
- c. **Métodos de partículas / Particle methods**
 - c1. Emisiones de rayos X inducidas por partículas / Particle induced X-ray emission (PIXE)
 - c2. Análisis de activación de neutrones / Neutron activation analysis (NAA)
- d. **Métodos ópticos / Optical methods**
 - d1. Espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente / Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES)
 - d2. Espectrometría de absorción atómica / Atomic absorption spectrometry (AAS)
 - d3. Microscopio óptico / Optical microscopy (OM)
 - d4. Microscopía de interferencia / Scanning interference microscopy (SIM)
 - d5. Microscopía de fuerza atómica / Atomic force microscopy (AFM)
- e. **Métodos de espectrometría de masas / Mass spectrometry methods**
 - e1. Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente / Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICPMS)
 - e2. Espectrometría de masa de ion secundario / Secondary ion mass spectrometry (SIMS)
- f. **Métodos de estado de oxidación / Oxidation state methods**
 - f1. Resonancia por spin de electrón / Electron spin resonance (ESR)
 - f2. Espectrometría visible y ultravioleta / Ultra violet and visible spectrometry (UV-VIS)

Pese a tener tanta variedad de métodos y técnicas para el análisis del comportamiento del vidrio, muy pocos de estos son utilizados, ya que, debido a su especialidad y precisión, son técnicas de alto coste.

5.2. La técnica – el *trencadís*

5.2.1. Antecedentes e historia de la técnica del *trencadís*

El *trencadís* es una técnica desarrollada como revestimiento de paramentos en la arquitectura catalana en donde piezas (*piastras*) de diferentes materiales, básicamente cerámica y vidrio, son fragmentadas mediante una cizalla¹⁴ para obtener pequeñas piezas de fractura irregular (*teselas*) para crear diferentes composiciones de forma y color, siguiendo la tradición del mosaico. Es por esto que, antes de profundizar en la técnica catalana, es necesario introducir la evolución y el desarrollo de los diferentes tipos de mosaicos hasta llegar a la técnica del *trencadís*.

El mosaico es la disposición ordenada de piezas iguales de pequeños tamaños y de diferentes materiales (básicamente piedra, cerámica y vidrio) con el objetivo de crear diseños complejos de grandes dimensiones, de acuerdo con las expresiones sociales, artísticas, religiosas, económicas, culturales, etc. Aunque el mosaico se popularizó y extendió con la cultura romana, tanto en calzadas públicas como en interiores privados, también existen muestras en la cultura griega y algunas culturas de Oriente Medio. Los primeros mosaicos de la época clásica se van a realizar a partir de guijarros y cantos pulidos de teselas en donde se representan diferentes escenas épicas. Sin embargo, va a ser con el Imperio romano que se va a convertir en un género artístico e industrial.

El primer tipo dentro del mosaico como arte va a ser el *opus*¹⁵ *tessallatum*. De este se van a desprender dos tipos, uno que va a cubrir los suelos llamado *lithostrotum*, y otro que compone los muros denominado *opus musivum*. Es a partir de estos tipos de mosaico que se van a desarrollar los demás, los cuales tendrán características técnicas y artísticas especiales¹⁶.

El procedimiento original para la composición de los mosaicos consistía primero en el alisado de la superficie natural del suelo para posteriormente extender un lecho de grava denominado *statumen*. Sobre esta primera capa se crea una siguiente de mezcla de cal y gravilla denominada *rudus*; a su vez, esta última está cubierta por una capa más fina de una mezcla entre cal y polvo de ladrillo (*nucleus*). Obtenida la base del suelo, se traza el diseño que se va a realizar y se procede con la incrustación de pequeñas piezas coloreadas denominadas *teselas*. Para finalizar el proceso se realiza un baño de la superficie con una lechada de cal y polvo de mármol blanco desleído en agua.

Con la época bizantina se transforma la técnica y se crea una fusión entre las técnicas arquitectónicas de la arquitectura oriental y occidental. El mundo musulmán aporta a Occidente el desarrollo de tres técnicas principales: el mosaico de vidrio, el mosaico de piedras y el mosaico que reemplaza a las antiguas taraceas¹⁷. En la primera técnica de este grupo, aparece el vidrio metálico, en donde se aprovechan las características de brillo y reflexión de la luz de los metales para crear ambientes llenos de espiritualidad y de grandeza. Es el cielo en la tierra.

En esta época, la arquitectura religiosa va a ser revestida interiormente por mosaicos formados con piezas doradas, plateadas e incluso piedras preciosas. Las características de estos materiales aplicados al revestimiento interior de la arquitectura cumplen con el objetivo de potenciar los

¹⁴ En ocasiones también se utilizaban otras técnicas como la fragmentación con las rodillas

¹⁵ Del latín obra, fábrica

¹⁶ Para ver tipos de opus ir al grupo de fichas FTO

¹⁷ Técnica en la cual se incrustan diferentes piezas de materiales duros en diferentes objetos de madera

espacios a través de la luz reflejada y de la perspectiva con el fin de mostrar el poder y el dominio religioso en la época.



Figura 1.1 Mosaico del Baptisterio Ariano en Ravenna, Italia

Terminado el Medievo, y coincidiendo con el periodo de esplendor de la producción del vidrio de Murano, la técnica de los mosaicos arquitectónicos sufre un declive. No es hasta el siglo XIX, con el desarrollo de diferentes movimientos artísticos, que se produce la revitalización de las técnicas musivarias¹⁸. Dentro de estos movimientos aparece el Modernismo catalán y con ello la técnica del *trencadís*.

El Modernismo catalán se va a desarrollar dentro de un ambiente en el cual la arquitectura ecléctica e historicista ya estaba implantada. Sin embargo, estas corrientes arquitectónicas no representan una identidad cultural propia, sino que se perpetúan y combinan modelos anteriores. Dentro de este ámbito de buscar un lenguaje propio, tres arquitectos van a ser los principales exponentes de la nueva corriente denominada Modernismo catalán. Antoni Gaudí, Josep Puig i Cadafach y Lluís Domènech i Montaner son los arquitectos del Modernismo puro¹⁹.

La nueva corriente predominante en la Cataluña de finales del siglo XIX y comienzos del XX se opone completamente a la replicación de elementos del pasado, pero plantea una reinterpretación de los mismos. Es así como nace el *trencadís*: es la recuperación de técnicas del pasado, pero aplicadas a un nuevo entorno y con nuevos materiales.

¹⁸ Lo relativo al mosaico

¹⁹ Afirmación realizada por la profesora Isabel Coll de la Universidad de Barcelona en la *Setmana Gaudí*

El nuevo mosaico modernista denominado *trencadís*, es un adjetivo que significa “*allò que es trenca amb facilitat*” (Feixa, 2018). Entonces, el *trencadís* se trata de la reinterpretación de técnicas aplicadas a los mosaicos que se realizan mediante la fragmentación de piezas mayores y de una manera fácil. Del mosaico romano, el Modernismo catalán reinterpreta la técnica del *opus lithostrotum* y la aplicación de materiales duros, como la piedra natural y el mármol, utilizándolos para el pavimento gracias a su resistencia. Una de las características principales de los muros del Modernismo es la sinuosidad de sus formas, para las cuales se utiliza el *opus tessellatum* y el *opus vermiculatum* con el fin de realizar los bordes de las figuras de los diseños. Por su parte, el *opus segmentatum* recuerda el aparente desorden de las teselas de *trencadís*.

El mosaico de piezas cerámicas va a ser la técnica más común en el nuevo movimiento catalán. Realizado a partir de baldosas esmaltadas y utilizado como revestimiento vertical, al principio, en la publicidad, se le denominaría inicialmente mosaico “árabe”, pero acabaría siendo tan popular que los mismos mosaiquistas abandonarían esta denominación para llamarlo genéricamente mosaico cerámico (Feixa, 2018). Es el método más utilizado, ya que se obtenían magníficos resultados (riqueza de tonos, refracción de la luz, creación de texturas, impermeabilidad, auto limpieza, permanencia de los colores originales y durabilidad) a un coste muy asequible, con ejemplos conocidos de uso de piezas rechazadas o de derribo.

El mosaico veneciano con su esplendorosa época bizantina aporta al Modernismo catalán la utilización de vidrios de colores y, sobre todo, la utilización de vidrios metálicos que resaltan el brillo y la grandiosidad de las obras y que son los vidrios de más categoría y de mayor calidad.

El primer paso para la construcción de un mosaico es pensar su ubicación, sea esta en el muro, en el suelo o en otro lugar. Posterior a esto, se realiza la producción de las teselas. Los materiales más duros se cortan mediante máquinas, mientras que los materiales más frágiles, como es el caso del vidrio, se cortan con tenazas. Cuando se obtienen las diferentes piezas, se procede a disponerlas sobre la base utilizando alguna de las dos técnicas posibles: directa (positiva) o indirecta (negativa). En la técnica directa se insertan las piezas suavemente en el mortero aun blando y posteriormente se esparce una lechada de rejuntado. En la técnica indirecta, las piezas se colocan invertidas sobre un papel con el dibujo a escala real y se vierte posteriormente el mortero. Una vez seco y endurecido el conjunto, se gira el dibujo y se moja el papel para que se deshaga.

Gaudí va a usar ambos métodos, pero se centrará más en la forma indirecta ya que, mediante la generación de moldes de yeso, le va a permitir crear diseños más complejos para después insertarlos en obra como prefabricados.

Como conclusión, el *trencadís* es un tipo de mosaico “menor” compuesto por piezas de corte irregular aplicadas de forma manual sobre bases de formas dinámicas²⁰ (curvaturas complejas²¹).

²⁰ También se aplica sobre formas estáticas

²¹ Debido a la aplicación de las superficies regladas

5.2.2. El *trencadís* en las obras de Gaudí

Para este apartado, se utilizan los proyectos seleccionados por Mireia Freixa y Marta Saliné en el libro *Gaudí i el trencadís modernista*. (Feixa, 2018)

Gaudí va integrando constantemente en sus obras nuevos conceptos y técnicas, los cuales va desarrollando en el tiempo. Existen dos momentos paralelos en las obras de Gaudí:

- La evolución de las diferentes técnicas aplicadas a cada proyecto
- La Sagrada Familia como obra que reúne todas las técnicas implementadas en las demás obras.

En este sentido, se podría decir que al mirar la Sagrada Familia podríamos hacer una lectura sobre el pensamiento de la utilización del *trencadís* en la obra gaudiana y, de hecho, es así. Pero es interesante ver el proceso de evolución de las diferentes técnicas en cada obra para entender la razón que lo llevó a utilizar determinada opción.

En las primeras obras de Gaudí, el *trencadís* se usa de una forma muy tímida y en zonas en donde el impacto visual no es muy fuerte. Empieza utilizando revestimientos materiales no muy caros y a menudo recuperados de otros procesos. En proyectos como el de los **Pabellones Güell**, la cerámica fragmentada reciclada es colocada en las juntas del mortero, mientras que las cúpulas de los dos pabellones son recubiertas por *trencadís* realizado con cerámica barata, monocroma y bañada en color para darle un mejor acabado. Las características de auto limpieza y de impermeabilidad de las piezas cerámicas esmaltadas hacen que estos elementos sean utilizados en las zonas más expuestas a la lluvia (figuras, chimeneas, cúpulas, etc.) y también en aquellas zonas en donde la incidencia de luz es mayor para aprovechar las características ópticas de la reflexión del material brillante.

Poco a poco los revestimientos de *trencadís* van ocupando lugares más significativos y notorios. En el caso del **Palau Güell**, se van a disponer en aquellos elementos que sobresalen de la estructura. Es decir, en las chimeneas de la azotea. Las chimeneas, además, poseen diferentes formas y las teselas de *trencadís* se van a adaptar muy bien a ellas. Aparte de la utilización de la cerámica y del ladrillo, en el Palau Güell se empiezan a utilizar las piezas de vidrio como elemento de revestimiento. En la **Torre Bellesguard**, el *trencadís*, además de utilizarse para revestir la arquitectura, empieza a ser una técnica utilizada en el mobiliario urbano y se empiezan a crear composiciones figurativas y geométricas. Se abandona pues la azotea, oculta en lo alto, por lo que el *trencadís* comienza a ser más visible.

Las teselas de *trencadís*, al bajar de la azotea al espacio del entorno y al mobiliario, logran su máxima expresión en el **Park Güell**. Es un proyecto de gran envergadura en donde Josep Maria Jujol va a ser el personaje principal para la elaboración de los diferentes elementos de *trencadís*. El Park Güell es considerado como el catálogo de los sistemas de aplicación de la técnica catalana y debe su razón a que por donde se mire esta está presente. Se puede encontrar en las cubiertas de los pabellones, en el pavimento y las almenas de la escalinata principal, en el dragón, en el muro de cierre del parque y en los acabados de los plafones de la sala hipóstila. Pero el banco ondulado es quien se lleva el protagonismo, ya que parece estar serpenteando por el parque gracias a sus colores, texturas y ondas. El banco fue realizado mediante elementos prefabricados debido a su tamaño, por lo cual, los moldes, que ya se habían empezado a emplear en la Torre de Bellesguard, son un elemento de innovación que permitirá la realización de grandes superficies revestidas por esta técnica.

En el Park Güell se pueden distinguir seis sistemas para la aplicación de los elementos de *trencadís* y son:

- Trencadís* monocromático con algunos cambios de tonalidad
- Trencadís* monocromático con dibujos abstractos insertados ya sean monocromáticos o policromáticos
- Trencadís* policromático con la fragmentación de la misma pieza, pero con una recomposición diferente con el fin de adaptarse a soportes de geometría compleja
- Trencadís* policromático con la fragmentación de las piezas, pero en las que se respeta el diseño
- Trencadís* policromático, generalmente abstracto, que sirve como fondo de un elemento que se quiere enaltecer

Trencadís policromático que incluye otros objetos cotidianos de vidrio o porcelana

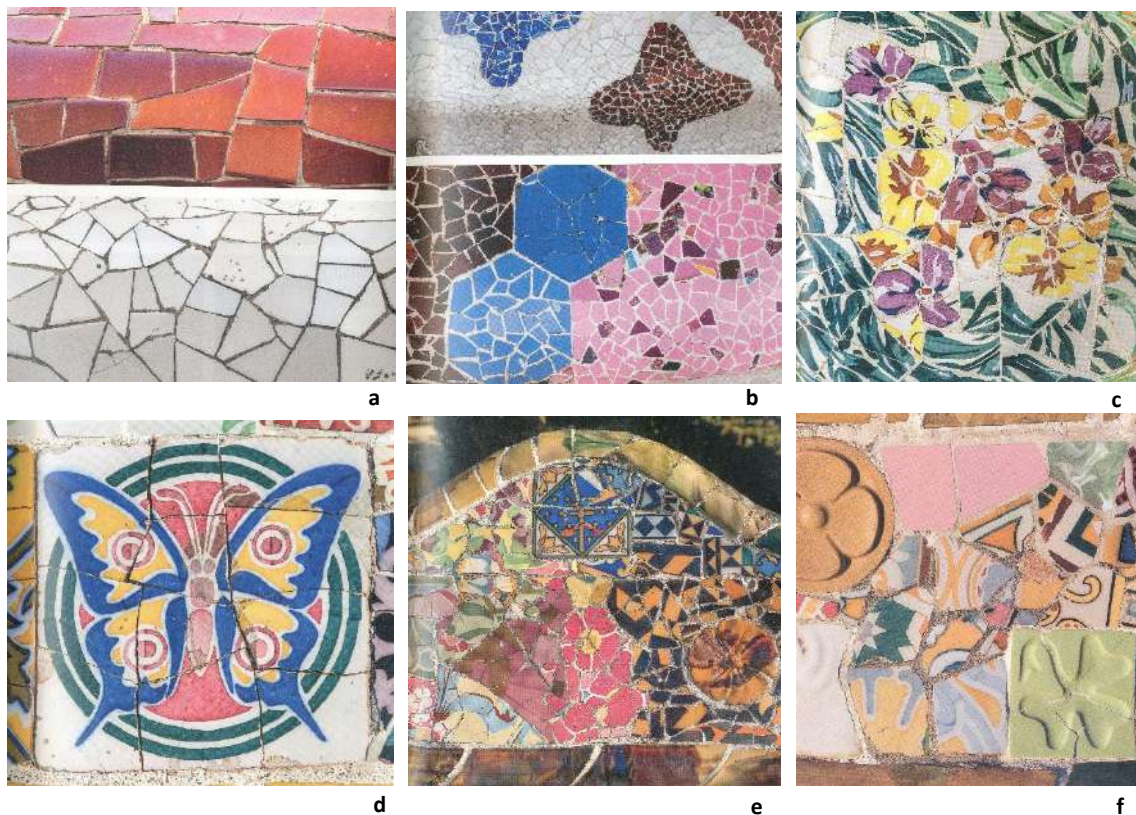


Figura 1.2 Sistemas de aplicación del *trencadís* en el Park Güell

En conclusión, se podía decir que el Park Güell es una superficie urbana de *trencadís*. Ahora bien, si en vez de cubrir un parque con las teselas de *trencadís*, se cubre un edificio, el resultado es mucho más llamativo ya que en menos metros cuadrados se concentran muchas técnicas. Esto es lo que sucede con la **Casa Batlló**. Es un edificio revestido casi que íntegramente por piezas de mosaico cerámico y *trencadís*. Mientras Gaudí iba aplicando diferentes técnicas a cada proyecto, a su lado seguía creciendo la basílica de la Sagrada Familia, la cual va a contener muchas de las técnicas y materiales empleados en los demás proyectos, pero se va a diferenciar por el empleo de los vidrios *smalti* de Murano y, especialmente, por los vidrios metálicos. Los materiales más caros y singulares para la obra de la vida de Gaudí²².

²² Ir al grupo de fichas FTG para ver la evolución del *trencadís* en los proyectos de Gaudí

5.2.3. Proyectos singulares realizados con vidrio metálico dorado

El vidrio metálico, y en especial el vidrio metálico dorado, va a adquirir mucha relevancia a lo largo de la historia de las artes. En la arquitectura se va a emplear en las obras de tipo religioso sobre todo para crear grandes superficies de mosaicos con representaciones de escenas religiosas en donde el material dorado, gracias a sus características para la reflexión de la luz y el brillo, crea atmósferas únicas llenas de espiritualidad y simbolismo. Este uso del dorado es paralelo a su uso en la pintura de tabla medieval, gracias a la tecnología del pan de oro.

El máximo esplendor del mosaico del vidrio dorado se presenta a partir del Imperio bizantino, en donde los mosaicos realizados con pequeñas piezas van a cubrir espacios interiores completos cargados de luz y brillo. Las estatuas van a ser prohibidas, por lo que serán reemplazadas por grandes representaciones planas de escenas religiosas con figuras humanas, envueltas en un ambiente dorado como símbolo de divinidad. Los mosaicos cubren tanto las paredes como los techos, incluso si la superficie es curva como en el caso de la cúpula. Los mosaicos de la basílica de San Apolinar, realizados hacia el año 540 d.C., y los de la basílica de San Vital de entre los años 546 y 548 d.C., ambas en Rávena, Italia, son de los más importantes y de los cuales aún hoy se conserva una gran parte. Una década más adelante, con la basílica de Santa Sofía de Constantinopla, las superficies doradas adquieren aun mucha más magnitud.

El desarrollo y la exportación de la tradición de los mosaicos dorados se va a concentrar en el mar Mediterráneo en donde la mezcla cultural entre Oriente y Occidente estarán en continua actividad ya sea por procesos de comercio o invasiones militares de raíz religiosa. Es este el caso de la cúpula de la mezquita de la Roca de Jerusalén, uno de los lugares más sagrados y con continuos cambios debido al contacto con diferentes religiones. Sus mosaicos realizados entre los años entre el 687 y el 691 d.C. son una gran muestra de la yuxtaposición religiosa entre Oriente y Occidente. En países como España, debido a su posición geográfica y a su contacto con el norte de África, la presencia musulmana dejará grandes obras de la arquitectura como la mezquita de Córdoba. Sus mosaicos de vidrio dorado que datan del año 786 d.C. no contendrán imágenes religiosas con presencia de humanos o escenarios naturales como ocurría en el arte bizantino, sino que representan composiciones geométricas con el protagonismo de líneas curvas y caracteres árabes con escrituras del Corán.

La Edad Media fue un momento de auge para la tradición vidriera de la República de Venecia, logrando una fama internacional que se mantuvo a lo largo de los siglos hasta la industrialización. En la basílica de San Marcos, los mosaicos bizantinos de los interiores realizados en el siglo XIII son la muestra de la grandiosidad del vidrio dorado en la tradición veneciana. Los arcos de San Alipio del acceso principal de la Basílica serán el testimonio de este hecho. Son el espacio de transición entre el exterior y el interior. Aun así, el material dorado no se utilizaba como revestimiento exterior, seguía oculto bajo la protección de los arcos. Gaudí va a ser quien se encargará de sacar al exterior el mosaico del vidrio dorado y lo expondrá con la nueva técnica del *trencadís* hacia finales del siglo XIX e inicios del XX en los pináculos de la Sagrada Familia.

A partir de este momento, el vidrio dorado se exportará a lugares más alejados como Estados Unidos, donde se empleará para cubrir tanto espacios interiores como en la Basílica Nacional del Santuario de la Inmaculada concepción de Washington realizados en el 2005, como para revestimientos exteriores como en el Academy Museum of Motion Pictures, en el 2017. También explorará nuevas fronteras en países como Dubai, en donde el oro, como símbolo de lujo y brillo, será también empleado en recubrimientos exteriores.

5.3. La Obra – La Sagrada Familia

Como es sabido, la basílica de la Sagrada Familia es la obra con la que Gaudí se dio a conocer al mundo. Es una obra rica de elementos de detalle, en donde el arquitecto aplicó todos sus conocimientos, tanto compositivos como estructurales, introduciendo técnicas nuevas o reinterpretadas.

Aunque el objetivo de este apartado no es hacer una descripción histórica ni constructiva de la basílica, cabe la pena introducir puntos clave en el desarrollo de la obra. La Sagrada Familia es un proyecto que hereda Gaudí del arquitecto Francisco de Paula del Villar, quien desarrolla una propuesta para una construcción religiosa típica de la arquitectura gótica.

En esos momentos Barcelona estaba viviendo la coexistencia de un sin número de corrientes arquitectónicas de tipo eclécticas e historicistas. Gaudí, en busca de lograr una identidad local a través de la arquitectura y la religión, rediseña la basílica pasando por diferentes fases hasta resultar el proyecto que conocemos hoy en día.

La Sagrada familia es un proyecto que Gaudí no logró ver finalizado (ni siquiera nosotros, en el siglo XXI aun lo hemos visto), pero dejó marcadas las pautas para su realización, pues era consciente que el proyecto llevaría muchos años de construcción. El arquitecto no dejó textos ni anotaciones estrictas de cómo realizar el proyecto ya que, como buen artista revolucionario²³, entendía que la obra sufriría en su materialización la aplicación de nuevas tecnologías en su construcción y, probablemente, sería dirigida por manos de diferentes arquitectos en donde cada uno implementaría los conceptos y las pautas señaladas por Gaudí, pero concretaría el proyecto a su manera. Gaudí siempre buscó que su arquitectura fuera una simbiosis entre técnica y solución formal. Por lo cual, cada elemento, hasta el más mínimo, presenta estas dos características bien equilibradas.

Los pináculos no van a ser la excepción a la aplicación de los conceptos gaudianos. El pináculo de San Bernabé, finalizado en 1925, fue el único de los doce pináculos de las fachadas que vio terminado Gaudí. El pináculo es el remate de las torres campanario y su punto de inicio es a partir de la corona que a su vez es la cubierta del último espacio accesible de la torre. El pináculo es una estructura revestida en piedra y en mosaico veneciano de vidrios de tipo *smalti* o metálico. El uso de estos materiales, aparte de por su calidad, es aconsejable por su alta resistencia a los fenómenos medioambientales. De manera lógica, las piezas que se disponen en las partes más altas de la basílica que, seguramente, serán las que más ataques directos afrontarán.

Los materiales utilizados en el revestimiento de los pináculos son ricos en cuanto a su composición cromática y su capacidad de reflexión de la luz se refiere. La técnica del revestimiento de *trencadís* del Modernismo catalán ha sido la seleccionada para revestir las formas más complejas de estos elementos.

En la convención titulada “ANTONI GAUDÌ. UNA PROPOSTA DI LIBERTÀ”, la cual fue llevada a cabo en Milán en el año 1993, el arquitecto Carlo Mezzetti describe el proceso de levantamiento del pináculo de San Bernabé a través de software y herramientas básicas y simples como el Sistema fotogramétrico PHOX y AutoCad.

El resultado se puede observar en la figura 1.1. Primero, se realizó un levantamiento *wire frame* en donde se reconstruyó cada parte del pináculo por separado. A través de este levantamiento,

²³ Revolucionario en el sentido de búsqueda del cambio y de la innovación

se lograron identificar cuatro zonas: el remate superior, el nodo central, la base y la zona de unión entre la base y el nodo central. Posterior a este levantamiento, realizado con el sistema fotogramétrico, y mediante el software AutoCad, se realizó el modelado sólido y se eliminaron las líneas del *wire frame*. Es importante tener conocimiento de este levantamiento ya que, a partir de él, se logran entender los diferentes procesos constructivos con los que se realizó el pináculo. Además, sirve para identificar e individuar cada una de las partes de éste, con el fin de encontrar patrones comunes de acuerdo con cada zona.

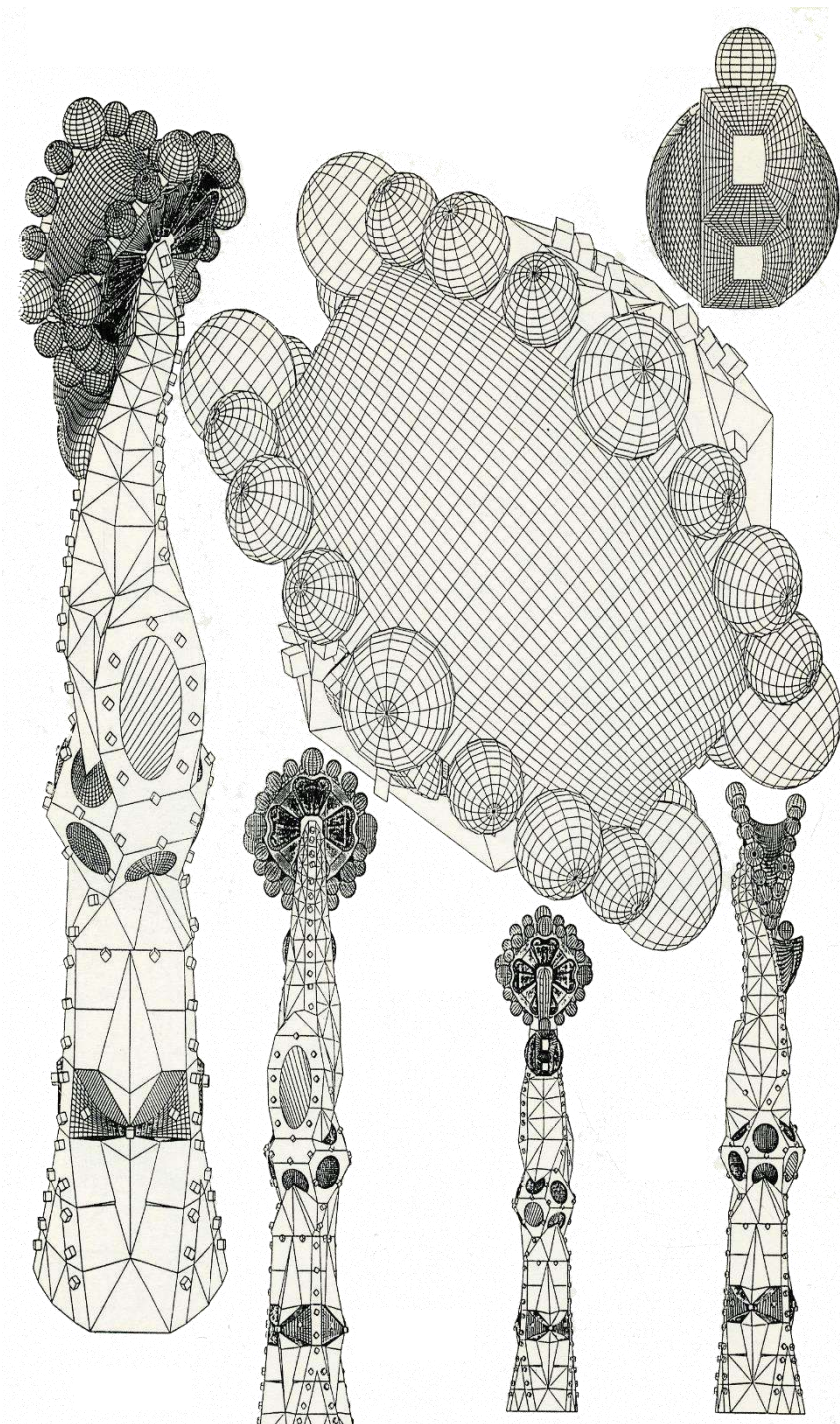


Figura 1.1 Estructura *wire frame* del levantamiento del pináculo de San Bernabé

5.3.1. Principios utilizados en la composición de los pináculos de la Sagrada Familia

Los pináculos son una macla de formas (Alsina, 2002), es decir, es una yuxtaposición de formas geométricas que conviven y configuran una superficie. En algunas zonas como por ejemplo en el báculo superior, encima del anillo, se crean vaciados de volúmenes en donde se substraen algunas partes del elemento, en este caso para crear un hueco que servirá para la disposición de las futuras luminarias del pináculo. Algunos elementos también son diseccionados en donde se retiran partes y quedan los elementos sustraídos, como es el caso del anillo. Una característica común de todas las formas es el redondeo de los bordes y las esquinas.

Las formas que principalmente utiliza Gaudí en sus composiciones, son aquellas superficies que se obtienen a partir de seccionar un cono, es decir, las formas cónicas (circunferencia, elipse, parábola e hipérbola). A partir de las cónicas, se generan diferentes tipos de desplazamiento o rotaciones que son las que van a crear las famosas superficies regladas de las que tanto uso hace Gaudí en sus proyectos. Dentro de las formas regladas destacan:

- Helicoide: Superficie regenerada por el movimiento de una recta apoyada en una hélice y en el eje del cilindro que la contiene
- Hiperboloide: Superficie por las rectas que se encuentran entre dos elipses iguales y paralelas y que rotan en sentido opuesto
- Paraboloide elíptico: Superficie reglada generada por la rotación de una parábola en torno a su propio eje
- Paraboloide hiperbólico: Superficie reglada formada por el desplazamiento de una parábola generatriz respecto a una parábola directriz situada en el mismo plano
- Elipsoide: Superficie que se forma a partir del giro de una elipse en torno a uno de sus ejes
- Esfera: Superficie que nace a partir del giro de una circunferencia sobre su diámetro

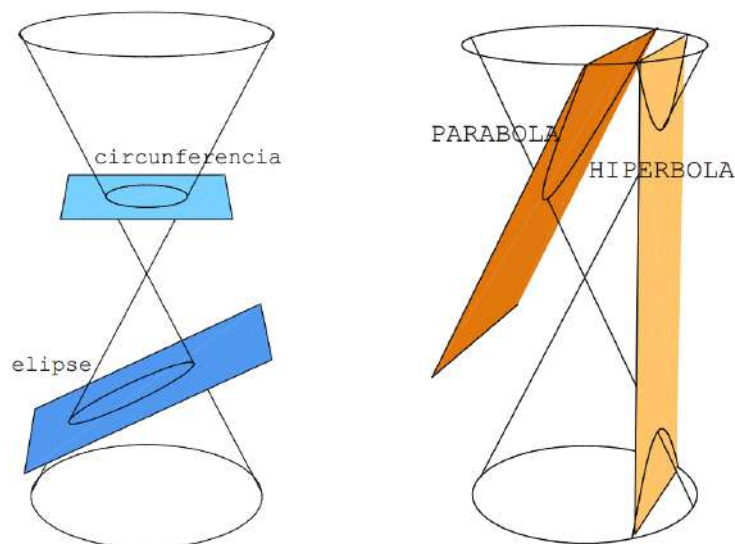


Figura 1.2 Secciones cónicas

Al respecto de las superficies regladas, Gaudí va a decir: *“The hyperboloid is light; the helicoid is movement, the hyperbolic paraboloid, the father of geometry. All of these surpassing the conoids and ellipsoids which where the first shapes I used. Continuous forms are the perfect ones”* (Bonet i Armengol, 2007).

5.3.2. Partes del pináculo de San Bernabé

El carácter simbólico de los pináculos es muy importante ya que representa a los comisionados de Dios en la tierra: los obispos. Como se ha mencionado en los apartados anteriores, los pináculos están divididos en cuatro partes, tanto estructural como simbólicamente. En la coronación se encuentra la mitra, la cual alberga la cruz sostenida por el báculo en cuya zona intermedia es envuelto por el anillo. En la parte inferior de este grupo se ubican las espigas con las palabras *Hosanna* y *Excelsis* y, bajo estas, la corona, que es la encargada de unir las pilastras de la torre con la estructura del pináculo. Cada uno de estos elementos tiene una técnica y materiales diferentes en cuanto a su construcción, debido a que estos iban cambiando a medida que la construcción avanzaba. Debido a la complejidad de las formas, Gaudí utilizó piezas prefabricadas a partir de moldes realizados con yeso para conformarlas.

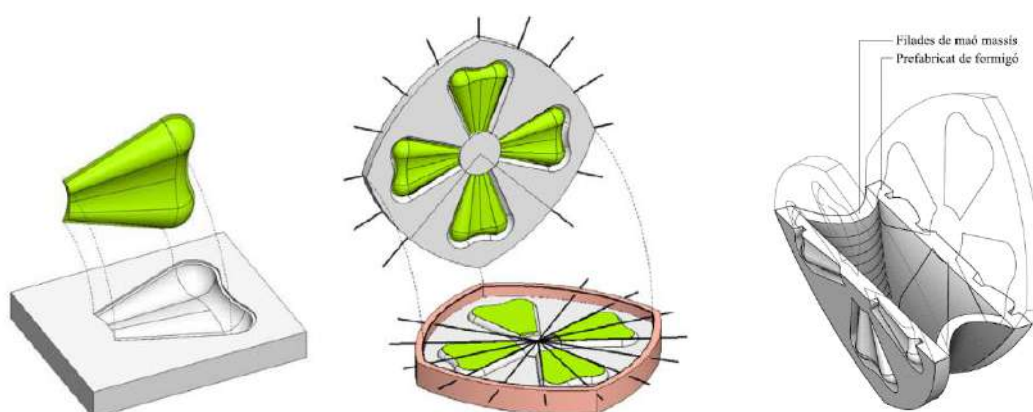


Figura 1.3 Proceso prefabricado para la fabricación de la mitra y la cruz

En la parte más alta del remate del pináculo, la mitra se abre formando una especie de flor revestida por elementos de *trencadís*. El contorno es delimitado por 15 esferas blancas y en las superficies de las caras que se abren se dibuja una cruz ondulada con revestimiento de *trencadís* de vidrio metálico dorado. En la figura 1.3 se puede observar el proceso de fabricación de las piezas de la mitra según las investigaciones del Dr. Genís Àvila. La estructura de la cubierta de estos elementos está compuesta por ladrillos macizos y revestida por *trencadís* de vidrio blanco.

El báculo está dividido en dos partes: báculo superior y báculo inferior. El báculo superior va desde la mitra hasta el anillo y el inferior, desde el anillo hasta el comienzo de las espigas. El báculo superior se conecta a la mitra mediante unos elementos de forma convexa con aristas que contienen la letra dedicada al apóstol que representa el pináculo, en este caso la "B" de Bernabé. Este primer tramo de báculo, si se observa detalladamente, rompe con la verticalidad precisa de las agujas y las torres de las típicas construcciones. La ligera inclinación se logra a partir de la composición de las piezas representa la curva del báculo de los obispos.

El anillo es conformado por la macla entre dos cubos rotados, pero con una disposición especial para que encajen perfectamente con la estructura de unión de los dos tramos de báculo. Tanto el báculo superior como el anillo poseen dos vaciados en donde se dispondrán reflectores para iluminar diferentes partes de la basílica. El anillo está revestido casi que completamente por *trencadís* de vidrio metálico dorado sobre bases de formas convexas.

El báculo inferior, revestido por teselas de *trencadís* rojas, blancas y amarillas, posee formas con superficies regladas (hiperboloides principalmente) que son el resultado de la abstracción de un

ángel. Esta zona en ninguna de sus caras posee la técnica del *trencadís* de vidrio metálico dorado. La base interior de la estructura del báculo está hecha a partir de piedras de Montjuïc y, el exterior con piezas de hormigón prefabricado. La cámara que queda como resultante en el medio de los dos paramentos se rellena con hormigón.

La base del báculo inferior se conecta a las espigas mediante el empleo de ladrillo, hormigón y piezas triangulares de basalto. El último tramo del pináculo está compuesto por las espigas. Se tratan de piezas de piedra talladas en forma de hexágono irregular, todas ellas de diferentes dimensiones. Las piedras más grandes se sitúan en la zona más alta de las espigas debido a que, según los análisis de Gaudí, se permitía una mejor visibilidad, pues cuando se mira desde la calle, la imagen se observa desde un ángulo de contrapicado. Las figuras en las piedras están talladas con formas cóncavas con aristas, en forma de estrellas de diferentes puntas y, revestidas por *trencadís* de vidrio metálico. Por su lado, las letras, se realizan con piezas de cerámica regulares, formando las palabras *Hosanna* y *Excelsis*. Las demás zonas están conformadas por ladrillos en *opus sardinell* o *spicatum* y piezas de cerámica rojas y verdes.

El pináculo termina con una base a forma teórica de hexágono piramidal denominada corona. Tres hiladas de piedra conforman la corona, dispuestas de una manera especial para poder realizar una perfecta integración entre las pilastras de la torre y el pináculo. Algunas de las piedras son tallas de igual manera que en las espigas, conformando formas convexas.

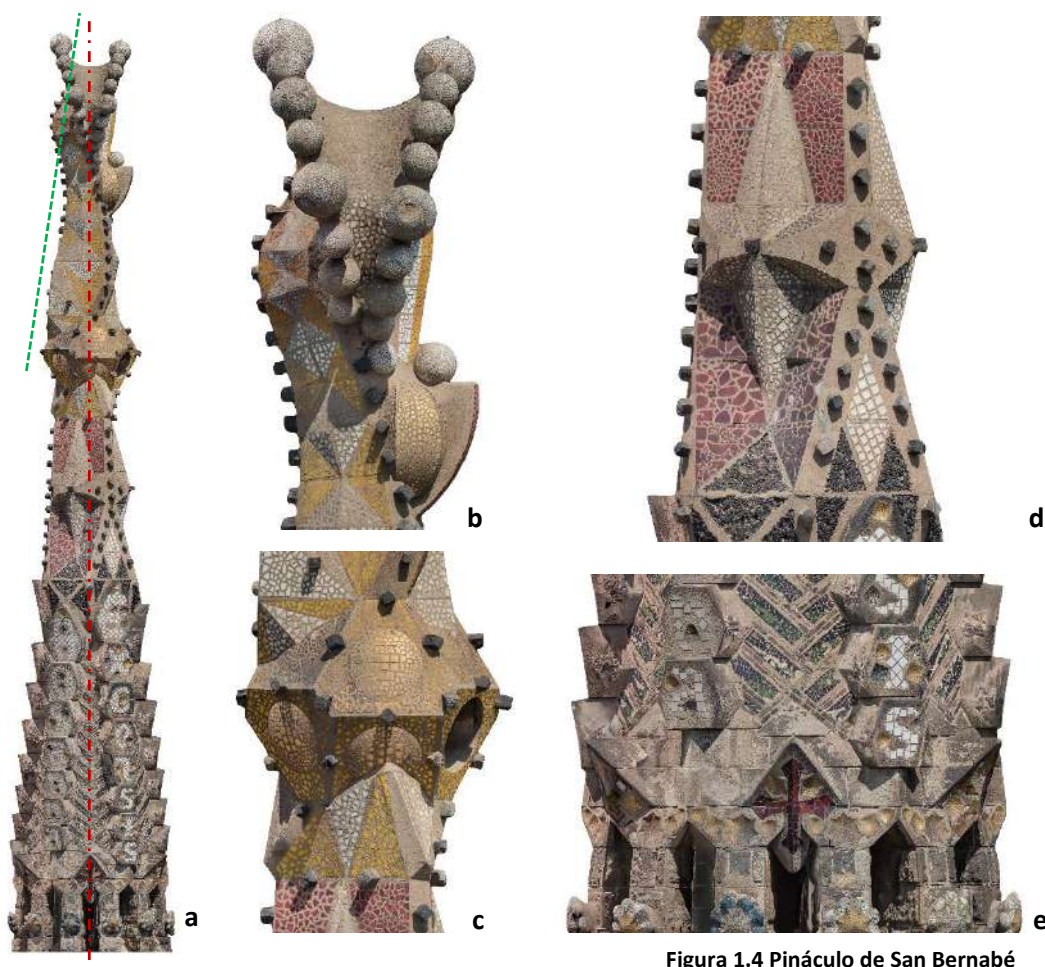
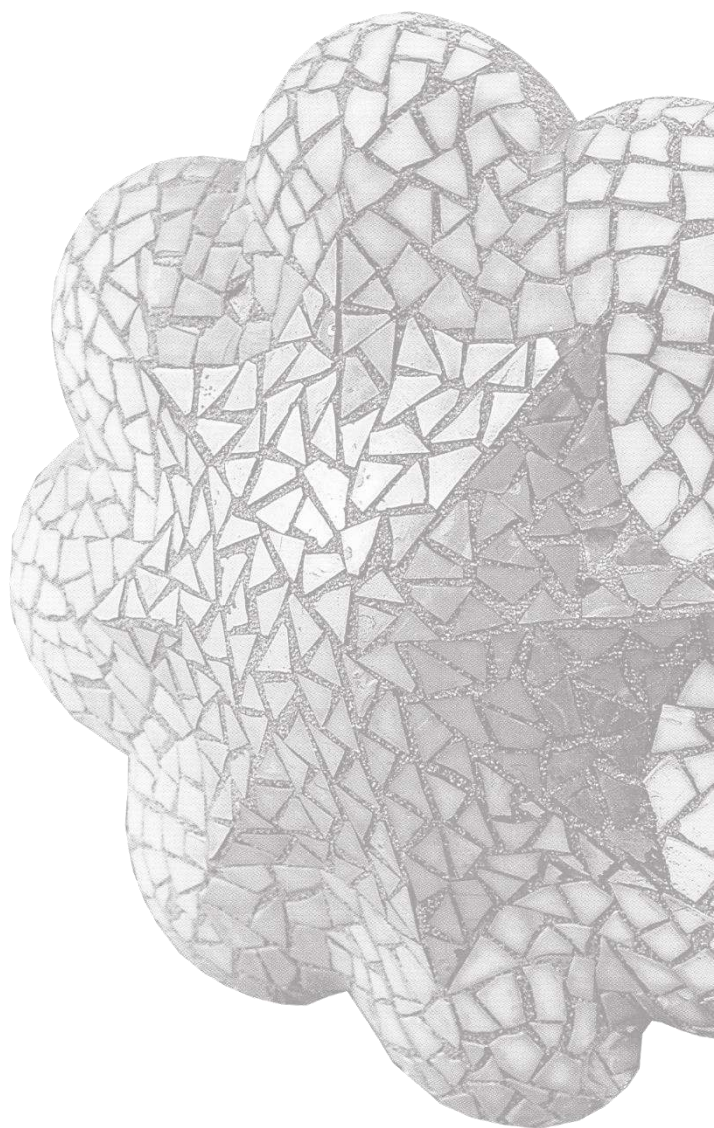


Figura 1.4 Pináculo de San Bernabé
a. alteración de la verticalidad, b. mitra, c. anillo, d. báculo inferior-ángel, e. corona



6. Desarrollo de la Investigación

6.1. Análisis desde el material

6.1.1. Material proveniente de fábrica (análisis cualitativo)

El vidrio metálico dorado es un vidrio compuesto, lo que quiere decir que posee más de una capa (dos capas de vidrio + una lámina interpuesta de pan de oro). La función principal de este producto compuesto es la de aportar el máximo brillo, textura y reflejo gracias a las propiedades que posee el elemento dorado. Las dos capas de vidrio, al tratarse de elementos de diferente espesor, aportan, por un lado, la protección frente a ataques externos y, por otro, la transparencia, característica propia de estos elementos. Al tratarse de un revestimiento exterior, cada elemento cumple una función específica de acuerdo con el método de colocación. En el método *tradicional*, el vidrio de mayor espesor es quien hace contacto con el material de la base; es el encargado de resistir los ataques internos que afectan a los diferentes materiales que componen al vidrio metálico dorado. Por su parte, el vidrio de menor espesor es el encargado de proteger la lámina de pan de oro de las acciones de los fenómenos naturales y otros fenómenos externos. El vidrio metálico dorado, en el método de montaje tradicional, posee esta disposición ya que lo que se busca principalmente es aprovechar al máximo las características del material dorado sin perder la protección de un vidrio. Por el contrario, el método de colocación *actual* cambia de orden la disposición de las capas. Se sacrifican algunas de las propiedades de brillo del elemento dorado ya que el vidrio de mayor espesor se dispone al exterior con el fin de resistir mejor los ataques externos.

Otra de las particularidades que aportan las láminas de pan de oro al vidrio metálico dorado, es que se trata de un material heterogéneo, lo cual aporta mucha riqueza visual y compositiva gracias a la generación de brillos y sombras que se crean por la superficie de contacto, el ángulo de incidencia, el reflejo y a la absorción de la luz.

El vidrio metálico dorado ha sido utilizado durante siglos en diferentes artes decorativas. En la arquitectura se empezó a utilizar como un elemento de revestimiento interior para embellecer los espacios, denotar un estatus social y, también, como símbolo de luz. Mundialmente existen varios proyectos que destacan en el uso de este producto como revestimiento, pero sin duda alguna, el proyecto más relevante, gracias a la procedencia y al desarrollo especializado del material, es la Catedral de San Marco en Venecia.

A lo largo de la historia, este material fue utilizado casi que exclusivamente en revestimientos interiores, pero Gaudí se va a dar cuenta de su riqueza y decide utilizarlo por primera vez como revestimiento exterior. El arquitecto quiso aprovechar al máximo las características del vidrio metálico dorado para general reflejo en los pináculos de su obra más importante: la Sagrada Familia. Al ser un material tan excepcional, va a ser muy limitado su uso y se va a emplear en puntos específicos en los cuales se pueda aprovechar al máximo su brillo. Gaudí, va a utilizar este elemento aplicando la técnica del *trencadís*, muy famosa en gran parte de sus obras, pero nunca antes con la utilización de un vidrio metálico. Sin embargo, es sabido que un material a largo plazo nunca va a comportarse de igual manera en un espacio interior, protegido y con determinadas condiciones respecto a un espacio exterior en donde deberá soportar los efectos de los fenómenos ambientales a lo largo de su vida de servicio, por no hablar de la dificultad añadida de su mantenimiento. Para poder entender las anomalías que se generan en el vidrio metálico dorado cuando está en servicio, es importante identificar primero las anomalías que son propias del material. Por lo cual, el objetivo de este capítulo será analizar en qué Estado Primario llega el vidrio desde la fábrica.

6.1.1.1. Detalles del material de estudio

Objeto a analizar: muestras de Vidrio Metálico Dorado (Vetro dorato di Murano) en estado nuevo directamente proveniente de las manos del productor y distribuidor (Orsoni, Italia)

Transporte utilizado para la distribución: Camión

Cantidad de muestras: 10 *piastrelle*²⁴

Metodología de análisis: visual - comparativo

Dimensiones de la pieza: 8 x 8 cm (estándar) y 6 mm de espesor aproximadamente

Composición: 1 capa de vidrio transparente de 5.95 mm aprox. (cara A) + 1 lámina de pan de oro de entre 0,0001 mm y 0,000001 mm + 1 lámina de vidrio transparente de entre 0,0001 mm y 0,000001 mm (cara B)

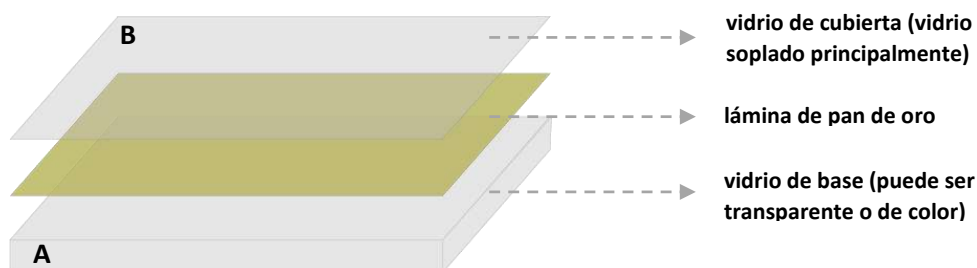


Figura 1.1 Composición de una *piastrella* de vidrio dorado de Murano

Método de corte: manual mediante cortador y regleta de parrilla metálica o mecánico mediante maquina especializada (ver 4.1.1.2 proceso de fabricación)

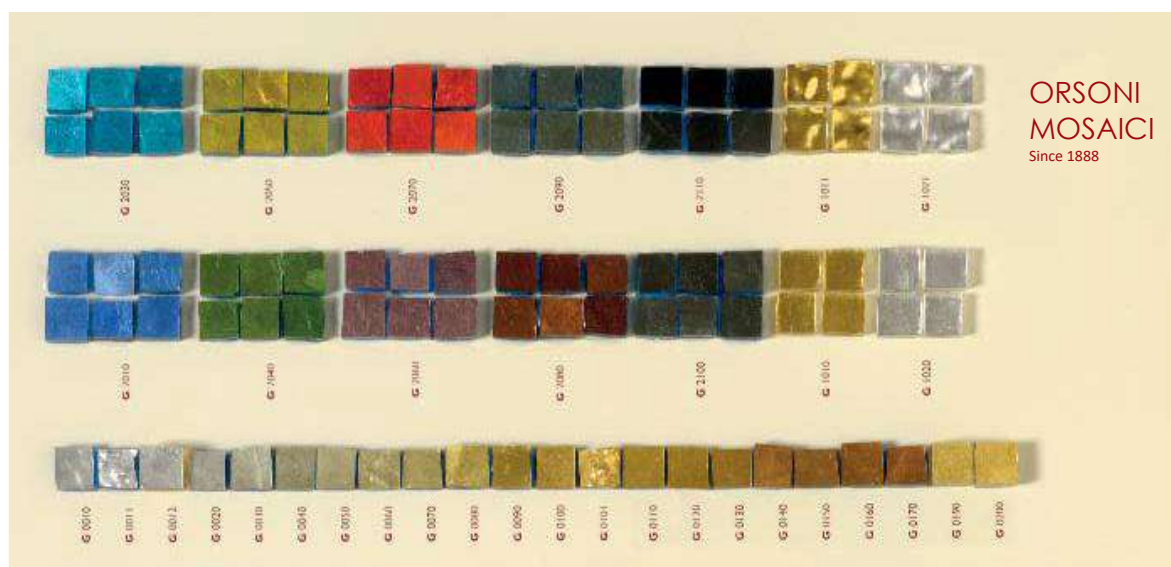


Figura 1.2 Catálogo de vidrio metálico de Murano de la empresa ORSONI

²⁴ *piastrelle*: del italiano para denominar las teselas de vidrio dorado con dimensiones 8x8cm

6.1.1.2. Interpretación del proceso de fabricación del vidrio metálico dorado

El vidrio metálico dorado debe su singularidad a la utilización de láminas de pan de oro en su composición. El oro es un material dúctil y blando que no se corroe al aire. No es reactivo ni tóxico, es un excelente reflector de la radiación infrarroja, es muy buen absorbente de calor y, además, posee una extremada reflexión de la luz visible. Dentro de las debilidades se encuentran que es fácilmente deslustrado por el azufre (pérdida de brillo), atacado por el cloro y por soluciones cianuradas en presencia de oxígeno y además es insoluble en ácidos. Debido a que las láminas de pan de oro son un producto especial de fabricación artesanal, en ocasiones, se hacen aleaciones con otros metales para reducir su coste y para obtener diferentes variaciones en el color. Sin embargo, estas aleaciones, al ser con otros metales, pueden alterar algunas de las características del oro ya mencionadas.

Colores	Oro	Plata	Cobre
Oro fino	750	250	—
Oro rojizo	456-460	—	20-24
Oro rojo claro	464	—	16
Oro muy oscuro	456	12	12
Oro oscuro	444	24	12
Oro Cidra	440	30	10
Oro amarillo	408	72	—
Oro amarillo claro	384	96	—
Oro Limón	360	120	—
Oro verde claro	312	168	—
Oro blanco	240	240	—

Colores de las hojas de oro	Oro	Cobre	Plata	Paladio	Platino	Kílates
Oro amarillo puro	100	—	—	—	—	24
Oro semi-amarillo vivo	91,5	1,5	7	—	—	22
Oro azul	75	—	—	25	—	18
Oro gris	94	—	—	6	—	22,5
Oro blanco	50	—	50	—	—	12
Oro rosa	80	—	4	12	4	18
Oro rojo	97	3	—	—	—	23,5
Oro verde pálido	66	—	34	—	—	16
Oro verde agua	60	—	40	—	—	14,5
Oro naranja	91	3	6	—	—	22
Oro limón	75	—	25	—	—	18
Oro semi - limón	89	—	11	—	—	21
Oro oscuro	94	2	4	—	—	22,5
Oro oscuro especial	95	2	3	—	—	22,75
Oro especial para exteriores "Ducado"	98	0,5	1,5	—	—	23,5

Tabla ilustrativa de la composición de las hojas de oro y el nombre que reciben según los datos tomados de Hiscox, G.D. Y Hopkins, A.A., *El recetario industrial*.

Tabla comparativa de la composición de hojas de oro de distinto cromatismo. Confeccionada a partir de los datos incluidos en Hiscox, G.D. Y Hopkins, A.A., *El recetario industrial*.

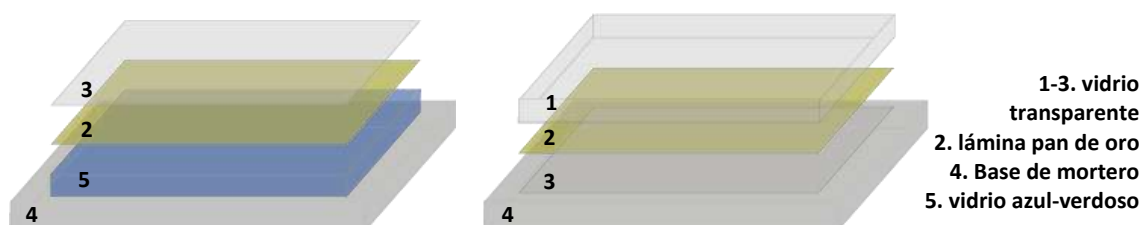
Izquierda: composición de las hojas de oro
Figura 1.3 Derecha: aleaciones para variación en los colores

Para poder interpretar las diferentes anomalías del vidrio metálico dorado que provienen de fábrica es importante entender primero el proceso de fabricación. Al tratarse de un producto compuesto, hablamos de la fabricación previa de elementos individuales y después de la unión de estos. Dentro de los procesos, los más importantes a valorar serán la fabricación del pan de oro y la confección del vidrio metálico dorado. No entraré a describir el proceso de fabricación de los dos vidrios de protección, pues se trata de una fabricación simple de un vidrio común.

"For the production of ancient glass, sand (SiO₂) was used as the main component, modified with lime (CaCO₃) or magnesium carbonate (MgCO₃) and with soda (Na₂CO₃) or potash (K₂CO₃) to reduce the melting point of the mixture." (Römich, 1999)

Hay que aclarar que el vidrio metálico dorado utilizado por Gaudí estaba compuesto por un vidrio traslucido de color azul-verdoso para potenciar el brillo del dorado debido a que las

láminas de pan de oro, al ser heterogéneas y de poco espesor, permiten el paso de la luz. Al colocarse en grandes extensiones y sobre una base de mortero de cemento, el color gris de este material produciría un ensuciamiento aparente del color dorado. Esta técnica, la del uso del vidrio traslucido, fue utilizada hasta los años 2011-2012, el momento en que se decidió girar las teselas y que el vidrio de mayor espesor fuese el que da a la intemperie y, por ende, ya no podría ser colorado sino totalmente transparente.



Izquierda: composición vidrio dorado utilizado por Gaudí (método tradicional)
 Figura 1.4 Derecha: composición vidrio dorado utilizado posterior a Gaudí (método nuevo)

A continuación, veremos el proceso de fabricación de las láminas de pan de oro y del vidrio dorado.

A. Proceso de fabricación de las láminas de pan de oro

Aunque existen algunas variaciones en diferentes momentos del proceso de acuerdo a las empresas y a las mejoras que van incorporando, aun así, siempre se siguen los mismos pasos básicos para poder obtener las láminas de pan de oro. El proceso que se detalla a continuación es el resultado de las investigaciones sobre la aplicación del pan de oro de la Dra. Laura de la Colina Tejeda²⁵ y el análisis de diferentes videos que describen los diferentes métodos.

1. **Pesado:** Se pesa el oro proveniente de otros restos.
2. **Fundido:** Con el fundido se consigue un lingote de 1cm de espesor aproximadamente.
3. **Laminado I:** Es el primer laminado que se realiza en donde se introduce el lingote en dos rodillos horizontales. Este proceso se realiza muy lentamente para no perder la maleabilidad del oro.
4. **Acompasado y Corte:** Por lo general, se realiza una medida con un compás para saber por dónde cortar las cintas que han salido del laminado. Después de esto, se juntan las láminas para continuar con el siguiente paso.
5. **Laminado II:** Mediante este segundo laminado, el objetivo es pasarlo por otros rodillos para obtener piezas de 4cm x 4cm.
6. **Contrapeado y corte:** Las piezas se colocan contrapeadas, es decir, una sobre la otra a mitad de esta, se dobla perpendicularmente con un taco de madera y se corta por la mitad. Luego se vuelven a contrapear y a cortar resultando piezas de 2cm x 2cm.

A partir de las piezas obtenidas de 2 cm x 2cm, continúan varios procesos de **martillado** con diferentes niveles de fuerza para ir reduciendo el espesor de las láminas.

²⁵ Información expuesta en la Tesis de Doctorado de la Dra. Laura de la Colina Tejeda

7. **Batido del devastador:** El primer paso para realizar esta parte del proceso es restar humedad al aparato que va a recibir el oro a lo cual se denomina “*preparado*”. Seguido a esto se “*carga*” el oro para posteriormente realizar el proceso del batido que consiste en golpear las láminas mientras van girando. Seguido a esto se cortan láminas de 4cm x 4cm.

8. **Batido de la soldada:** Se realizan los mismos pasos del proceso anterior con el objetivo de seguir reduciendo el espesor.

9. **Batido del molde:** Es la fase final de martillado en donde se busca que el centro de la superficie y el resto tenga el mismo espesor y no tenga defectos.

10. **Pasado a los libros:** Es el último paso en donde se pasan las láminas a libros de papel de seda blanco para preservar la humedad. La medida final de las láminas es de 8cm x 8cm que es la medida estándar.

Durante el proceso de fabricación de las láminas de pan de oro puede ocurrir que el oro se *agrie*. Esta situación puede suceder en repetidas ocasiones. En ese caso, el oro pierde maleabilidad, por lo cual se tiene que volver a cocer²⁶ y se genera un “*resudado*” en el cual se crea una mayor cohesión molecular por la que el oro aumenta su densidad.

Existen otros métodos alternativos actuales como la *precipitación galvanoplástica* en donde se busca obtener un espesor mucho menor de las láminas de pan de oro. Tal y como menciona la Dra. De la Colina Tejada*, en esta técnica “...se pone en el baño una placa fina y limpia de cobre, que se conecta por un polo a la corriente, la cual precipita el oro sobre la placa; para separar la hoja de oro se sumerge la placa en una solución de cloruro férrico, que disuelve el cobre, dejando intacto el pan de oro formado” (De la Colina Tejada, 2001).

Cabe la pena aclarar que la Dra. De la Colina Tejada, también menciona la existencia de láminas de pan de oro denominadas “*de oro doble o Ducado*” que fueron pensadas para resistir a la intemperie.

De todas formas, ni la técnica de la precipitación galvanoplástica, ni el uso de hojas de oro doble parecen ser el caso de las hojas de pan de oro que se utilizan en el vidrio metálico dorado. La fabricación sigue siendo lo más artesanal posible y con el mínimo de variables respecto a su origen.

²⁶ La acción de cocer un metal es el cometimiento de las materias primas a calor en un horno con el fin de que pierdan humedad y adquieran determinadas características que se buscan



Figura 1.5 Proceso de fabricación de láminas de pan de oro

B. Proceso de fabricación del vidrio metálico dorado

Posterior a la producción o adquisición del elemento singular encargado de generar brillo (láminas de pan de oro), las piezas de vidrio dorado se completan con los elementos de protección: el vidrio. Este material ha variado muy poco en su composición desde sus inicios (arcilla y óxidos metálicos), se lleva a un estado de fusión con temperaturas mayores a 1000°C. El vidrio metálico dorado, que posee dos capas de protección con vidrios de diferente espesor, adquiere su función de revestimiento exterior en este proceso.

0. Previo a la unión de las diferentes piezas, el vidrio de menor espesor, obtenido mediante la técnica de soplado, ha sido recortado artesanalmente a partir de globos de gran tamaño con dimensiones superiores a las medidas de las láminas de pan de oro (8 cm x 8 cm).

1. En el primer paso de este proceso, las láminas de pan de oro son unidas al vidrio de menor espesor ya cortado y fabricado y, llevadas al horno a una temperatura que permita la unión de las dos piezas, pero no a un estado de fusión²⁷

2. El siguiente paso consiste en la generación de la capa de protección principal (vidrio de mayor espesor) en donde el vidrio fundido se vierte sobre la cara expuesta de la lámina de pan de oro

3. Mientras el vidrio es aún maleable, se pasa a través de varios rodillos para lograr el espesor deseado (5.95 mm aproximadamente)

²⁷ T fusión del oro= 1064°C

4. Las *piastrelle* ya conformadas, son levantadas y giradas para permitir la integración de los elementos
5. Una vez las láminas de pan de oro están protegidas, el vidrio metálico dorado, se lleva al horno con el objetivo de sellar y de unir las diferentes capas
6. Las piezas vuelven a pasar por los rodillos ya que, al haber sido sometidas de nuevo a altas temperaturas, su espesor pudo haber variado
7. Después del enfriado, pero aun siendo maleable el vidrio, se cortan las piezas con la medida de las láminas de pan de oro (8cm x 8cm).



Globos de vidrio soplado



Corte de globos



Unión vidrio soplado y hoja



unión de lámina y primer vidrio



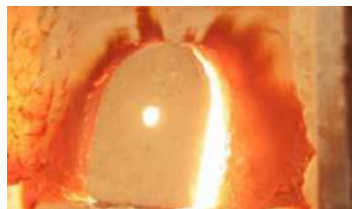
vertido del vidrio



aplanado con rodillos



recogida y giro



llevada a horno



enfriado



corte



producto final

Figura 1.6 Proceso de fabricación del vidrio dorado

6.1.1.3. Primera aproximación. Análisis Visual (sin microscopio) y metodologías de análisis

Como primer paso para la identificación de las anomalías provenientes de los procesos de fabricación, manipulación y transporte, se realiza una aproximación general a las piezas mediante una inspección visual y comparativa que permitirá identificar las zonas más importantes para realizar una inspección más profunda y determinar de qué se trata específicamente y cuál es su origen.

Las muestras a analizar son servidas por Orsoni, una de las empresas con más tradición en el sector en la isla de Murano, Venecia.

Para el estudio y la valoración de las *piastrelle* de vidrio dorado se ha seguido la metodología utilizada por el Dr. Raül Serra i Fabregà en el documento "*caracterizació i valoració del vidre murano de la SF*" del año 2014 (Serra i Fabregà, 2014) con algunas variaciones, ya que el documento mencionado analiza específicamente el vidrio *smalti* de color, una tipología de vidrio opaco y de una sola capa, mientras que el vidrio metálico dorado es traslúcido y está compuesto por varias capas. En este caso, se empleará la proyección de una luz blanca en la parte inferior de la cara a analizar.

Después de realizar diferentes pruebas para encontrar la mejor forma de realizar un levantamiento fotográfico acertado con las condicionantes que implica el tratamiento de un vidrio metálico dorado (brillo-reflejo) se ha aplicado la misma metodología que utilizó el Dr. Serra con la utilización del escáner plano.

Digitalización: Las *piastrelle* han sido digitalizadas mediante el uso de un escáner plano de referencia EPSON GT-15000 siguiendo el proceso que se describe a continuación:

- Limpieza cuidadosa de las dos caras de las 10 muestras de vidrio dorado mediante una solución líquida común para limpieza de cristales.
- Enumeración y marcado de las muestras por la cara del vidrio de mayor espesor con un rotulador rojo permanente.
- Disposición de las piezas (según el orden de enumeración) sobre el escáner plano por ambas caras.
- Escaneado de las imágenes mediante el software incluido en la instalación propia de la máquina con una resolución de 300 a 600 ppp.
- Retirada de las muestras y nuevo proceso de limpieza para repetir el proceso, pero esta vez para cada pieza individualmente.

Edición de las imágenes digitales: Las imágenes de las muestras, guardadas como elementos .jpg, no han tenido ningún tipo de tratamiento digital ni manipulación, ya que, como han sido escaneadas en grupo e individualmente, no ha sido necesario, y se han querido conservar tal cual las características levantadas mediante el escáner.

Después de realizar el respectivo levantamiento digital mediante el uso del escáner plano, al realizar una primera inspección ocular, se confirma que el vidrio metálico dorado se trata de un elemento heterogéneo y de fabricación artesanal, por lo cual nunca encontraremos una muestra igual a la otra. Aun así, existen una serie de características que son comunes y que generan patrones de anomalías también comunes.

Para poder identificar los patrones de anomalías, primero hay que tener en claro las diferencias que se pueden presentar entre las diversas muestras del producto para lo cual se realiza una valoración organoléptica previa. La primera característica que se puede notar al analizar las

diferentes muestras es que, al tratarse de un producto artesanal, las láminas de pan de oro muestran variaciones importantes en cuanto al liso de su acabado. Este primer fenómeno depende del proceso de fabricación de las láminas de pan de oro y es muy posible que se genere debido al nivel del golpeo de los martillos en los procesos de batido. También puede ocurrir que el material se haya *agriado* lo que ha hecho que su densidad, y por ende su acabado, se haya modificado. Es importante aclarar este factor resultante del brillo, ya que este puede variar de una *piastrella* a la otra.

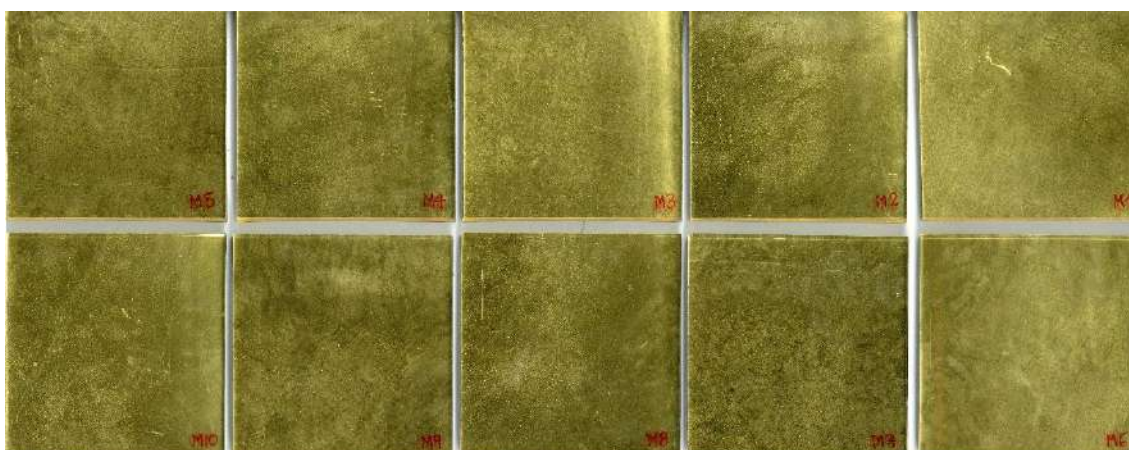


Figura 1.7 Muestras de las *piastrelle* a analizar - cara A (vidrio de mayor espesor)

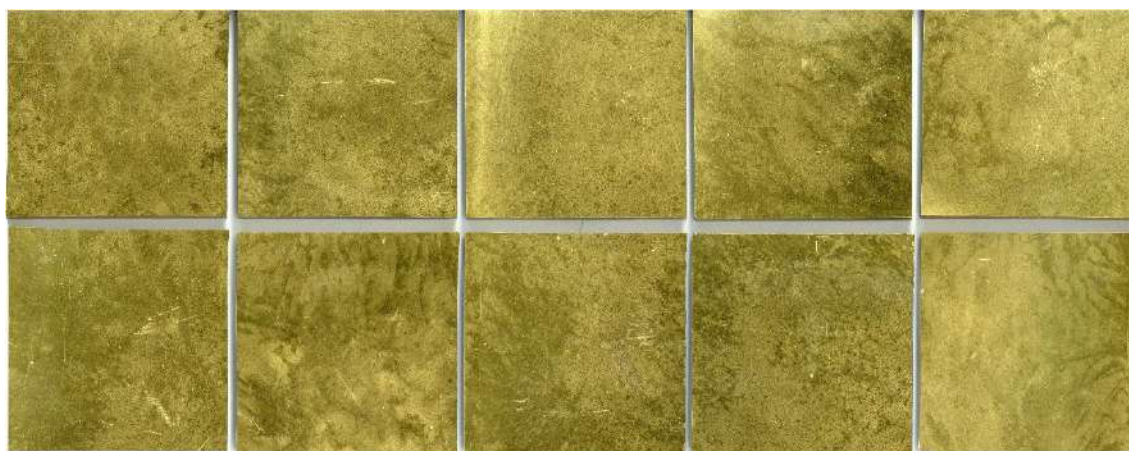


Figura 1.8 Muestra de las *piastrelle* a analizar - cara B (vidrio de menor espesor)

Valoración visual de las muestras: Se realiza una valoración visual de las 10 muestras de vidrio dorado con el objetivo de determinar los aspectos primarios para poder desarrollar el análisis posterior (microscópico) de las diferentes anomalías.

Dentro de las diferentes características y anomalías primarias encontramos:

A. Diferencia en la superficie de las láminas de pan de oro



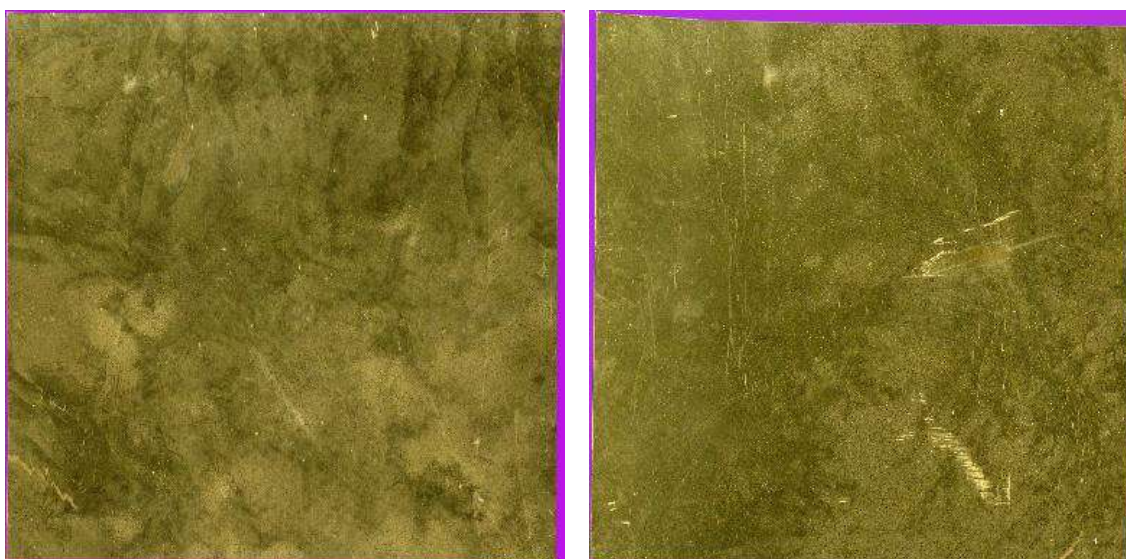
Muestra 6 - cara A (vidrio de mayor espesor)

Muestra 6 - cara A (vidrio de mayor espesor)

Figura 1.9 Diferencias de superficie entre las láminas de pan de oro

Además de la diferencia que se observa en la densidad de las superficies del material dorado, otra de las variaciones que se presentan en las *piastrelle*, debido a su elaboración artesanal, es la irregularidad en el corte. Aunque las dimensiones de las láminas de pan de oro son nominalmente de 8cm x 8cm, en la mayoría de las ocasiones estas medidas no son precisas debido a los elementos con los que se realiza el corte de los vidrios.

B. Irregularidad en el proceso de corte



Muestra 9 – cara B (vidrio de menor espesor)

Muestra 10 – cara B (vidrio de menor espesor)

Figura 1.10 Irregularidad en el corte

Durante el proceso de corte de los vidrios se puede también generar roturas con pérdida de material en los bordes de las piezas y más aún en las esquinas, ya que son los puntos más susceptibles debido a las tensiones que se generan tanto dentro del propio material como por la acción de cargas.

C. Líneas de regla



Muestra 7 – cara A (vidrio de mayor espesor)

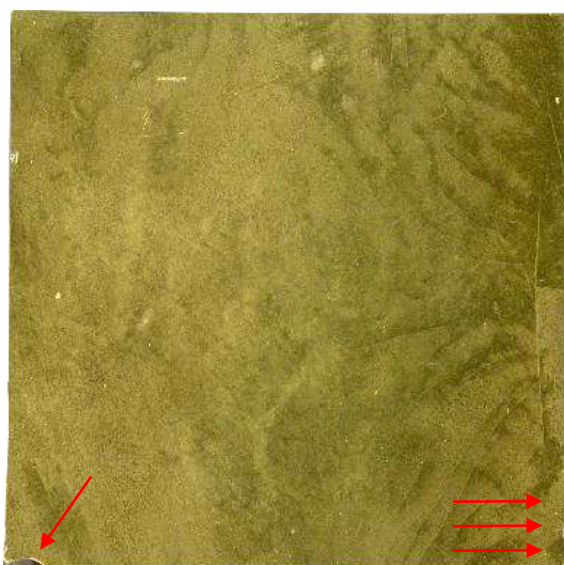


Muestra 4 – cara A (vidrio de mayor espesor)

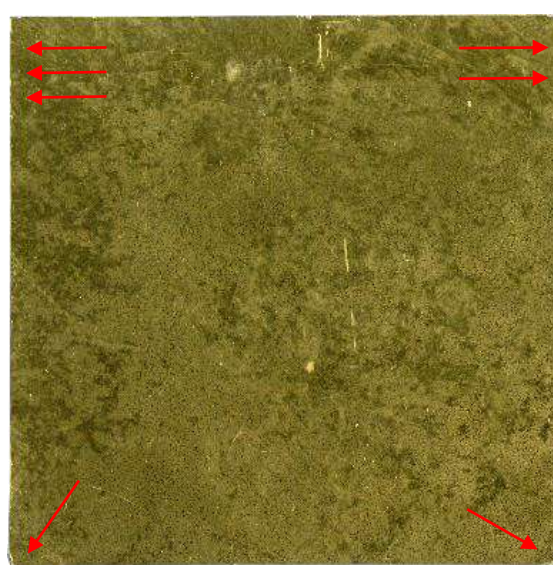
Figura 1.11 Líneas de regla

En los diferentes procesos en la fabricación de las láminas de pan de oro, puede generarse una situación especial con la presencia de líneas de regla de extremo a extremo. En algunas muestras es más evidente que en otras (figura 1.11), pero ambas responden a una anomalía generada en el contrapeado o el corte de las láminas pan de oro.

D. Pérdida de bordes y esquinas del vidrio



Muestra 6 – cara B (vidrio de menor espesor)



Muestra 7 – cara B (vidrio de menor espesor)

Figura 1.12 Pérdida de bordes y esquinas

Como se puede observar en la figura 1.12, la pérdida de vidrio en las esquinas y los bordes se presenta en el vidrio de la cara B y esto se debe a que, al ser el vidrio de menor espesor, es más susceptible de pérdida de material en caso de impacto. En esta ocasión la pérdida se genera en el proceso de fabricación, pero también puede ocurrir en los procesos de manipulación y transporte.

E. Puntos de corte material



Detalle Muestra 1 – cara A (vidrio de mayor espesor)



Detalle Muestra 4 – cara A (vidrio de mayor espesor)

Figura 1.13 puntos de corte

Los dos vidrios protectores del vidrio dorado poseen diferentes espesores, ya que, como se ha mencionado precedentemente, cumplen funciones diferentes. Las aristas desde donde se realiza el corte del vidrio de mayor espesor (cara A) dejan al descubierto una línea de puntos que en ocasiones resalta al brillo debido a que la reflexión de la luz es diferente.

F. Manchas



Muestra 1 – cara A (vidrio de mayor espesor)



Muestra 2 – cara B (vidrio de menor espesor)

Figura 1.14 Manchas

Otra anomalía que se presenta dentro de los procesos que se están analizando (fabricación, manipulación y transporte) es la presencia de manchas. Esta situación se puede presentar en cualquiera de las capas del vidrio dorado y puede responder a diferentes factores. En la muestra M1 de la figura 1.14 se observan manchas generadas por los restos de materiales en una zona determinada e interior a las capas. Por el contrario, la muestra M2 deja ver restos de materiales en la superficie del vidrio dorado. Está claro que la primera situación, al estar dentro de las capas,

se generó en el proceso de fabricación del vidrio dorado y en la unión de las diferentes capas. En cambio, la segunda situación pudo ocasionarse en cualquiera de los procesos.

G. Raspaduras en la superficie del vidrio

Las raspaduras de la superficie del vidrio es una anomalía muy común en todas las piezas. Este tipo de anomalía se caracteriza por manifestarse como una sucesión de líneas muy próximas, paralelas y con una trayectoria determinada. Se puede presentar en las caras expuestas de cualquiera de las dos capas exteriores (vidrios). Aunque es una anomalía muy superficial, da lugar a alteraciones en la transparencia y el brillo del vidrio.



Muestra 1 – cara B (vidrio de menor espesor)



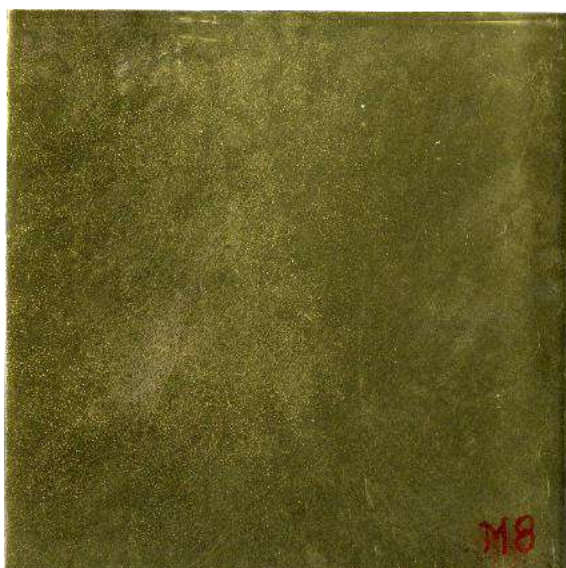
Muestra 10 – cara B (vidrio de menor espesor)

Figura 1.15 Raspaduras

H. Puntos de brillo



Muestra 2 – cara A (vidrio de mayor espesor)



Muestra 8 – cara A (vidrio de mayor espesor)

Figura 1.16 Puntos de brillo

I. Puntos oscuros



Muestra 4 – cara B (vidrio de menor espesor)



Muestra 8 – cara B (vidrio de menor espesor)

Figura 1.17 Puntos oscuros

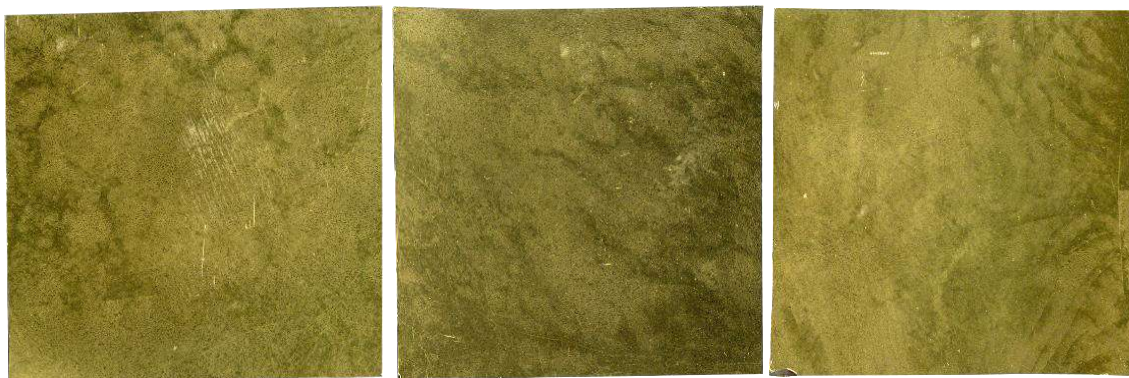
Las figuras 1.16 y 1.17 sirven para contrastar una situación especial que se genera en las dos caras del vidrio metálico dorado. La cara A, aquella de mayor espesor, presenta una serie de puntos de brillo que realzan diferentes zonas. En cambio, en la cara B, no aparecen estos puntos de brillo sino en cambio se observan puntos oscuros. Estos dos fenómenos parecen depender específicamente de dos factores: el primero, la composición heterogénea de la lámina de pan de oro y segundo, el espesor y la incidencia de la luz en los dos vidrios de protección.

Esta situación posiblemente se puede deber al contacto que se generan entre las diferentes superficies del vidrio metálico dorado. En el proceso de unión entre la lámina de pan de oro y el vidrio de mayor espesor puede generarse la entrada de aire, que permanece atrapada en forma de burbujas, lo que crea esta especie de puntos de brillo que se ven potenciados por las reflexiones del espesor del vidrio. Por otro lado, la unión entre la lámina de pan de oro y el vidrio de la cara B, al ser elementos con un espesor similar, hace que la luz posea un recorrido menor, por lo que es casi como si incidiera directamente sobre la lámina de pan de oro.

J. Manchones

La característica principal de los manchones es que siempre se encuentran en los bordes o esquinas del vidrio dorado. Se pueden especular diferentes orígenes de su posible aparición. Primero que todo, hay que tener en cuenta que la diferencia entre zonas más claras y más oscuras se debe a la densidad del material. Entre más densa sea el área, el paso de la luz a través de la lámina de pan de oro será más restringido. De esta primera apreciación se obtiene la primera hipótesis. La aparición de estos manchones se origina en el proceso de fabricación de las láminas de pan de oro y, más concretamente, durante el momento del martillado. Las áreas centrales de las láminas de pan de oro son las que poseen menos material. Esto quiere decir que han sufrido un mayor martilleo y su espesor es mucho menor. Por el contrario, los extremos son más densos ya que el martillado en esta zona es menos frecuente.

La segunda hipótesis parte del hecho de que los manchones se concentran en uno de los extremos solamente. Puede generarse esta situación al momento de la unión entre la lámina de pan de oro y el vidrio de menor espesor, ya que la unión se inicia desde un extremo. En este caso, no se trataría de una diferencia de densidad del material sino de un fenómeno que se genera debido al contacto y a la presión entre ambos elementos (pan de oro y vidrio).



Muestra 1 – cara B

Muestra 2 – cara B

Muestra 6 – cara B

Figura 1.18 Manchones

K. Desgaste



Muestra 8 – cara A (vidrio de mayor espesor)

Muestra 9 – cara A (vidrio de mayor espesor)

Figura 1.19 Desgaste

Al hablar de desgaste, se habla específicamente de una acción sobre las láminas de pan de oro debido a que son los elementos más susceptibles y delicados del vidrio metálico dorado. A diferencia de los manchones que ya hemos identificado en la figura 1.18, la pérdida de material es una acción generada y no una característica. Esta situación puede darse en los dos procesos de fabricación que se han descrito en este capítulo, tanto en la fabricación de las láminas de pan de oro como en la del vidrio metálico dorado. La pérdida de material se genera, principalmente, por el contacto de las láminas de pan de oro con una superficie adhesiva, como pudieran ser los dedos de la mano (en varias ocasiones aparecen registradas huellas, símbolo de que hubo un

contacto provocado con la superficie de la lámina de pan de oro). Aunque el contacto con los dedos son uno de los principales elementos que generan pérdida debido a su característica adhesiva, también otros elementos pueden generarla en una medida menor pero mucho más agresiva.

Los últimos tres patrones de anomalías pueden prestarse a confusión, pero la diferencia radica en que se generan en diferentes momentos y, además, en diferentes capas. En la figura 1.20, a simple vista, es posible identificar que se tratan de estrías y son propias de la lámina del pan de oro. Se tratan de líneas muy finas, seguidas, y la mayoría de veces conectadas, que crean una especie de ramificación. Las láminas de oro, al ser un material tan delicado, presentan esta situación ya desde el mismo momento de su creación.

Los quiebres en la figura 1.21 son generados en un proceso posterior que puede ser tanto en la manipulación de las láminas para conformar el vidrio dorado como en el mismo proceso de fabricación de las láminas de pan de oro. A diferencia de las estrías (que pueden aparecer en cualquier punto), los quiebres normalmente aparecen desde un extremo y se prolongan hacia el centro. Además, poseen más profundidad que las estrías, es decir, se trata de una acción más fuerte.

L. Estrías



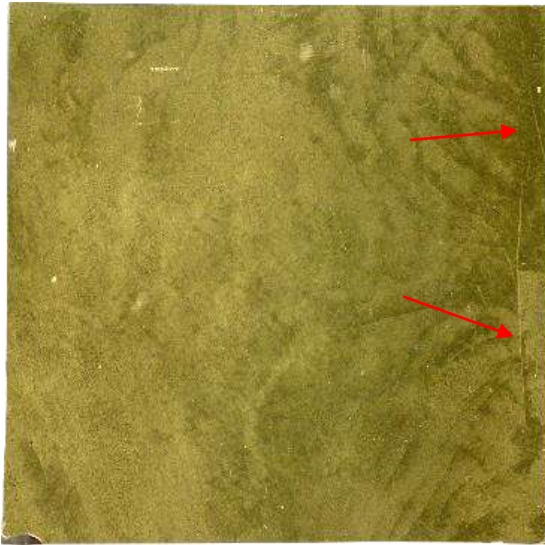
Muestra 7 – cara A (vidrio de mayor espesor)



Muestra 10 – cara B (vidrio de menor espesor)

Figura 1.20 Estrías

M. Quiebres



Muestra 6 – cara B (vidrio de menor espesor)

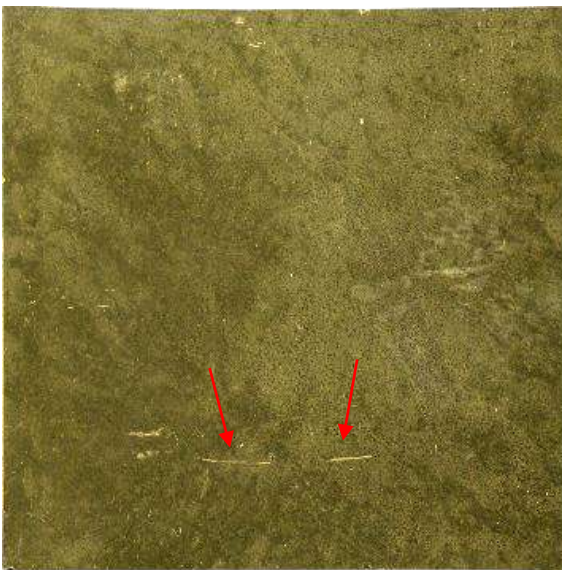


Muestra 5 – cara A (vidrio de mayor espesor)

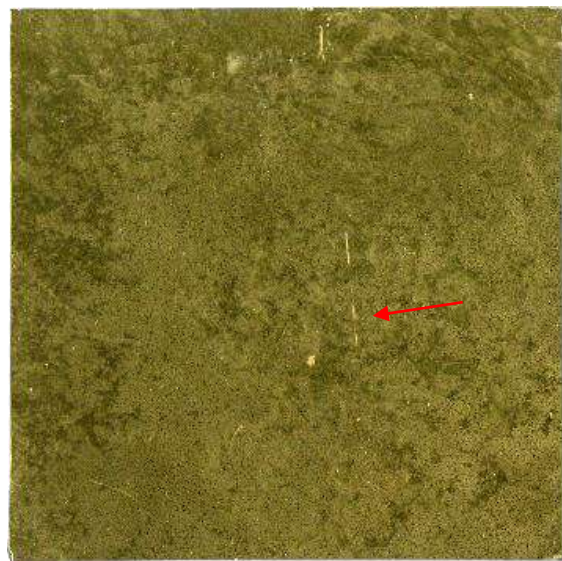
Figura 1.21 Quiebres

El ultimo patrón de anomalías de esta serie son los rayones. Se tratan de estructuras que se crean en las superficies de los vidrios de protección. A diferencia de las raspaduras de la figura 1.15, los rayones se caracterizan por tratarse de líneas aisladas. Las raspaduras, al ser varias líneas seguidas, generan una pérdida de transparencia mayor respecto a los rayones, ya que al tratarse de una línea no afecta a la transparencia, sino a el brillo del elemento porque en el vidrio se han generado nuevos bordes en donde la luz incide de una manera diferente y se crean nuevas reflexiones. Los rayones pueden generarse en cualquier momento del proceso.

N. Rayones



Muestra 8 – cara B (vidrio de menor espesor)



Muestra 7 – cara B (vidrio de menor espesor)

Figura 1.22 Rayones

6.1.1.4. Análisis visual-instrumental bajo microscopio

Después de una primera aproximación mediante la observación y la comparación a ojo del observador, se procede a hacer un análisis bajo microscopio óptico digital, que permite identificar con más exactitud en qué capa se sitúa cada anomalía y qué efectos está causando en el producto. Además, sirve para contrastar las afirmaciones que se han hecho y para identificar la presencia de otro tipo de anomalías que no son tan fáciles de identificar a simple vista.

Valoración de las anomalías de las muestras: Para el desarrollo de este análisis, se ha utilizado el método óptico: *Optical Microscopy*²⁸, con el cual se han realizado tres tipos de aumento dependiendo de la cara y el enfoque para poder determinar en qué capa de la muestra se encuentra albergada la anomalía; si se encuentran entre capas (a), en la lámina de pan de oro (b) o en las caras exteriores de los vidrios de protección (c). Primero se ha realizado un zoom de 19X por la cara B (el vidrio de menor espesor) con el fin de observar las anomalías que se ubican entre capas. Por la cara A se realiza el mismo procedimiento, pero esta vez se utiliza un zoom de 20X ya que se está analizando un vidrio de mayor espesor y, por ende, el enfoque para observar el material dorado se encuentra a una distancia mayor de la superficie. El último aumento se realiza a 160X en las dos caras ya que con este aumento interesa analizar lo que está ocurriendo en la superficie de los vidrios.

Se han encontrado las siguientes anomalías que se detallarán a lo largo de este apartado.

Anomalías entre capas (a) o en la lámina de pan de oro (b):

- Variaciones en la superficie de la lámina de pan de oro
- Pérdida de bordes y esquinas
- Manchas
- Puntos de brillo (burbujas)
- Manchones
- Pérdida de material (incluye desgaste)
- Estrías
- Quiebres
- Fisuras

Anomalías en las caras exteriores de los vidrios de protección (c):

- Pérdida de bordes y esquinas
- Suciedad
- Picaduras
- Raspaduras
- Hendiduras
- Quiebres
- Rayones

Es indispensable realizar este segundo análisis visual mediante microscopía digital (más especializado), ya que permite aproximarse mucho más a la realidad de las anomalías que se presentan. Sirve para confirmar en qué capa se manifiestan para, en un futuro, poder desarrollar

²⁸ Modelo Dino-Lite AM41115T

un plan de actuación sobre el elemento adecuado. También permite observar más en detalle la estructura que adquieren las diferentes anomalías con el fin de entender su desarrollo.

Hay que tener presente que las *piastrelle* de vidrio dorado no van a ser utilizadas tal cual llegan de fábrica, ya que el objetivo de uso para el cual se está analizando el vidrio metálico dorado en esta investigación es el de prestar servicio como revestimiento exterior en la arquitectura del Modernismo catalán, una arquitectura con formas sinuosas en donde el vidrio dorado debe adaptarse a las curvas para lo cual se usa la técnica del *trencadís* con la consiguiente fragmentación irregular y aleatoria de las *piastrelle*.

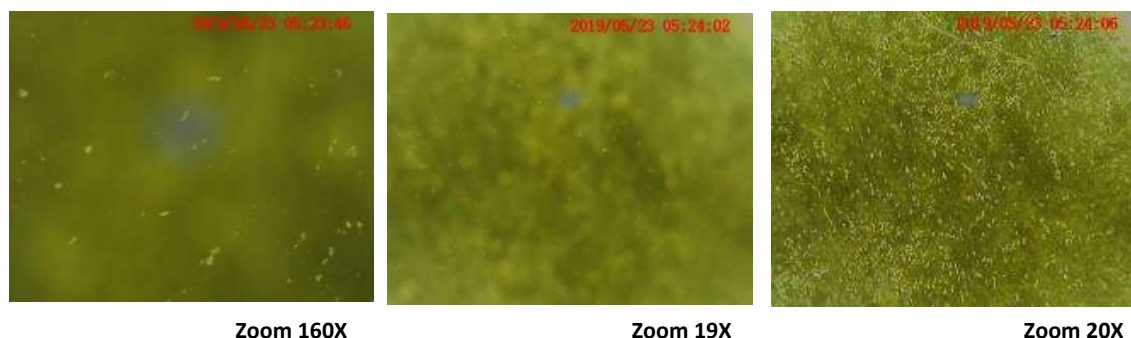
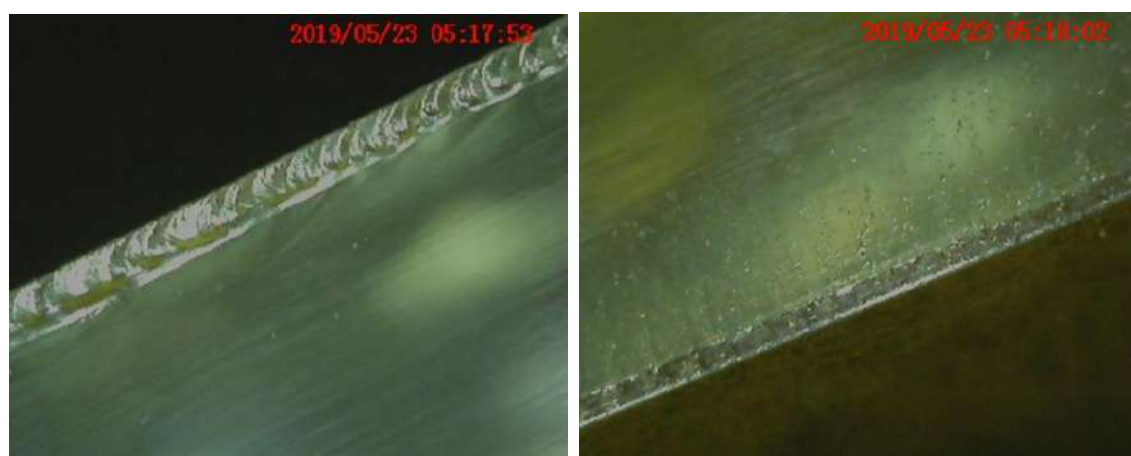


Figura 1.23 Diferentes aumentos utilizados para el análisis bajo microscopio óptico

En la figura 1.23 se puede observar el alcance de cada nivel de aumento sobre una misma área lo que permite entender en qué capa del vidrio dorado se alberga cada anomalía, cuáles son los efectos y las características que posee.

En la figura 1.24 se observan claramente los acabados de recorte de las dos caras de vidrio protector. La imagen de la cara A permite entender el método de recorte artesanal del vidrio y el momento en el cual fue cortado. Los trazos en especie de “onda” de las primeras capas del vidrio permiten comprender que hubo una penetración de la herramienta de corte hasta un punto y luego mediante la presión se realizó el corte del resto del vidrio. El vidrio de la cara B, aquel de menor espesor, permite concluir que se trata de un vidrio que ha sido previamente cortado con otra herramienta y que se ha adherido al conjunto para conformar el vidrio metálico dorado. Toda esta información no sería posible obtenerla si no se hubiera utilizado un análisis detallado bajo microscopio.



Cara A – vidrio de mayor espesor

Cara B – vidrio de menor espesor

Figura 1.24 Bordes de recorte de la *piastrella* de vidrio metálico dorado

6.1.1.4.1. Anomalías entre capas de vidrio o en la lámina de pan de oro

Cara A Zoom 20X / Cara B - Zoom 19X (detalle 160X)

Como ya se ha mencionado previamente, el objeto de análisis es un vidrio compuesto por lo cual las anomalías que se presentan pueden generarse en cualquiera de los elementos que lo componen, en cualquier capa o incluso pueden estar albergadas en medio de ellas. El primer enfoque que nos permite el microscopio es el aumento a 20X para la cara A (vidrio de mayor espesor) y de 19X para la cara B (vidrio de menor espesor).

Dentro de las variaciones que se encuentran entre las diferentes *piastrelle* de vidrio metálico dorado e incluso dentro de ella misma, podemos destacar las diferencias de las superficies de las láminas de pan de oro. En la figura 1.25 se observa que dentro de la misma muestra y en la misma cara (5B) hay una diferencia notable en cuanto a las superficies. Si entramos a analizar más detenidamente, la imagen de la izquierda presenta una superficie más lisa respecto a la de la derecha; además, existe una presencia menor de punto blancos (burbujas) y los manchones (lunares) son menos definidos. Esto puede deberse a que, durante el proceso de martillado de la lámina de pan de oro, la zona de la imagen de la izquierda haya recibido un martilleo más constante e intenso, lo que ha ocasionado que el espesor sea mucho menor. El proceso de la conformación del vidrio metálico dorado también es decisivo a la hora de entender estos cambios, ya que algunas zonas albergan menos cantidad de aire respecto a otras (baja ausencia de burbujas de aire en la imagen de la izquierda). Otra situación que se puede concluir es que entre más irregular sea la lámina de pan de oro en cuanto a su densidad superficial, el contacto con el vidrio albergará más burbujas de aire debido al espacio libre resultante que queda al generarse este contacto.

A. Variaciones en la superficie de la lámina de pan de oro



Muestra 5 - cara B



Muestra 5 - cara B

Figura 1.25 Superficie lamina de pan de oro

B. Pérdida de bordes y esquinas

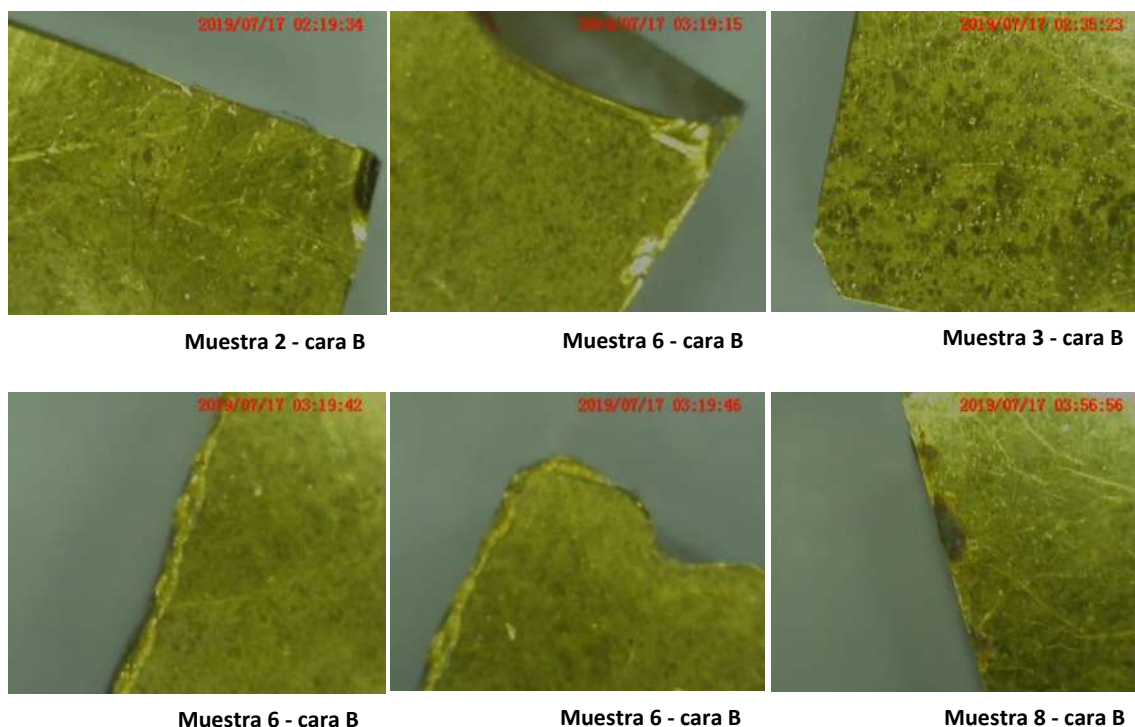


Figura 1.26 Pérdida de bordes y esquinas

Una de las anomalías que ya eran evidentes sin la utilización del microscopio era la pérdida de material en los bordes y en las esquinas. En esta serie de imágenes de la figura 1.26 se observa el nivel al cual puede llegar a afectar la pérdida de una parte del elemento. Todas las imágenes de las muestras utilizadas para la comparación corresponden a la cara B, ya que se trata del vidrio que tiene menor espesor y, por lo tanto, es el más sensible de sufrir una rotura y la consiguiente pérdida de material. La muestra M6B deja ver la pérdida completa del vidrio de menor espesor y de la lámina de pan de oro, pero el vidrio de mayor espesor aún permanece. Por el contrario, la muestra M3B presenta una pérdida total de la esquina de los tres elementos que componen el vidrio metálico dorado. Una situación particular se presenta en la muestra M8B en donde el vidrio protector se ha desprendido y se observa como los agentes exteriores han ido atacando al material dorado que quedó al descubierto.

Existen anomalías que afectan la transparencia del vidrio y el brillo de las láminas de pan de oro, y una de ellas es la presencia de manchas. Se generan, principalmente, a la hora de conformación del vidrio metálico dorado, y se pueden presentar por múltiples razones. En la figura 1.27 se observan dos situaciones: el resto de materia en la muestra M1A se trata de un trazo definido que puede llevar a pensar que ha sido realizado por error con algún tipo de instrumento, pero de ser así en vez de ser un resto, debería ser un desgaste de material. Entonces, se trata, probablemente, de una sustancia líquida que fue recorriendo parte de la superficie de la lámina de pan de oro hasta que se secó. En cambio, en la muestra M3B observamos que se trata de una forma no definida y además de una intensidad menor respecto a la anterior. Puede tratarse de una pérdida de material o de restos dejados en la cara interior del vidrio con algún objeto como pueden ser los dedos, los cuales podrían contener restos de alguna sustancia que quedó impregnada en esta superficie.

Manchas



Muestra 1 - cara A



Muestra 3 - cara B

Figura 1.27 Restos de materia

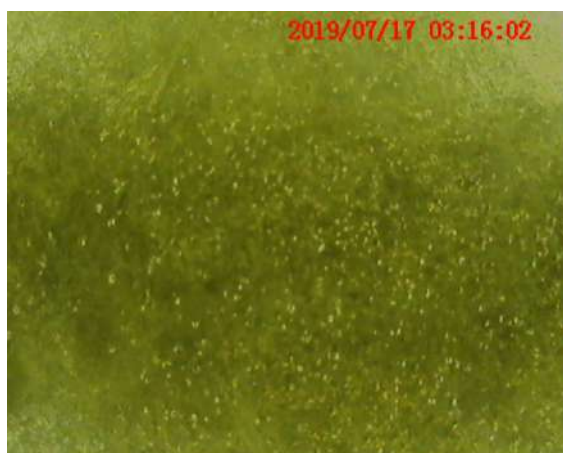
C. Puntos de brillo



Muestra 1 - cara B



Muestra 7 - cara A



Muestra 6 - cara A



Muestra 4 - cara A

Figura 1.28 Puntos blancos (Burbujas)

Casi como una constante en todas las muestras, el brillo se ve realzado y acompañado por una serie de “puntos de brillo” que tienen su origen tanto en la conformación del vidrio metálico dorado como en la fabricación del vidrio protector. Si se hace una ampliación de estos puntos de brillo (figura 1.29), se observa que en realidad se trata de burbujas de aire atrapadas tanto entre capas (unión entre lámina dorada y vidrio) como en la misma estructura del vidrio. La primera situación, se presenta a la hora de la unión entre la lámina de pan de oro y los vidrios de protección en donde, como ya se ha mencionado antes, de acuerdo al relieve y a la densidad de la lámina de oro, algunas burbujas de aire se van acumulando y van ocupando espacios libres que quedan entre las dos capas. La segunda situación, se crea en la fabricación del propio vidrio. No se tiene muy claro en qué momento del proceso de fabricación del vidrio se generan estas burbujas, pero pueden originarse con movimiento que se realiza a la hora de verter la fusión de los materiales sobre la cinta transportadora o al momento de pasar por los rodillos. En la figura 1.28 se pueden observar diferentes concentraciones de burbujas y tamaños.

Cabe aclarar que la denominación de “puntos de brillo” se debe a la reflexión que se genera de la incidencia de la luz en las burbujas de aire.

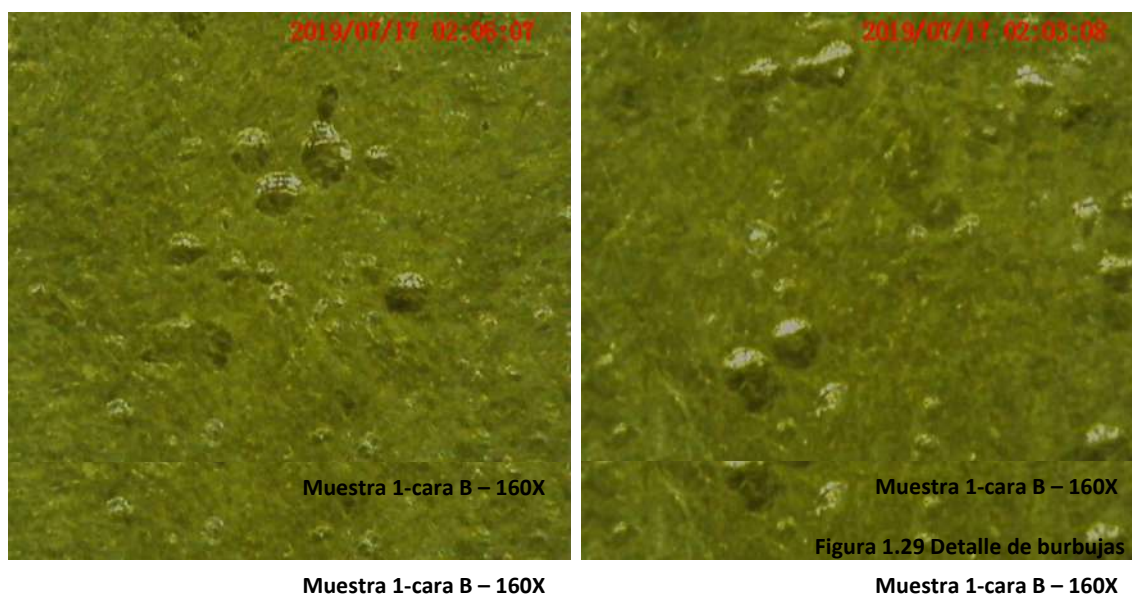


Figura 1.29 Detalle de burbujas

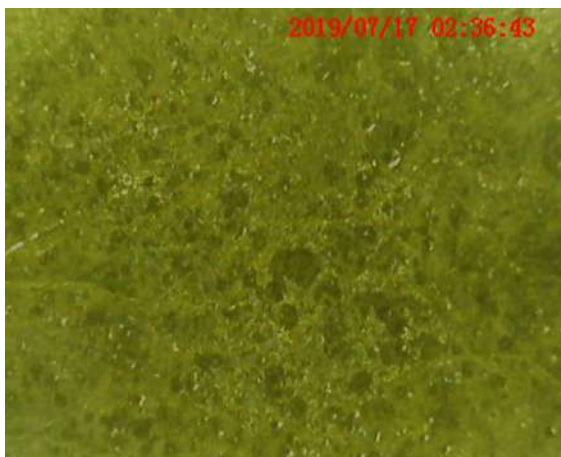
D. Manchones

En apartados anteriores se ha mencionado que los manchones son una característica propia de las láminas de pan de oro y se originan en el martillado al momento de su fabricación. Los manchones son agrupaciones de diferentes formas en donde predominan las redondas y elípticas asemejándose a cráteres lunares. En algunas ocasiones el centro de las formas aparece vacío y en otras completamente lleno (figura 1.31). Los manchones, al tratarse de una condición dependiente de la concentración y la densidad de material, generan diferentes relieves. Como se observa en la muestra M4A de la figura 9.27, en algunas situaciones, las formas se presentan muy juntas y se convierten en grandes manchas que ocupan un área mayor.

De esta característica derivada de la fabricación de la lámina de pan de oro dependen algunas anomalías que se presentan en los elementos, como es el caso del alojamiento de burbujas de aire debido al relieve, la aparición de fisuras o estrías por la diferencia de concentraciones de material o al martillado, la pérdida de brillo o reflexión de la luz, entre otras.



Muestra 1 - cara B



Muestra 3 - cara B

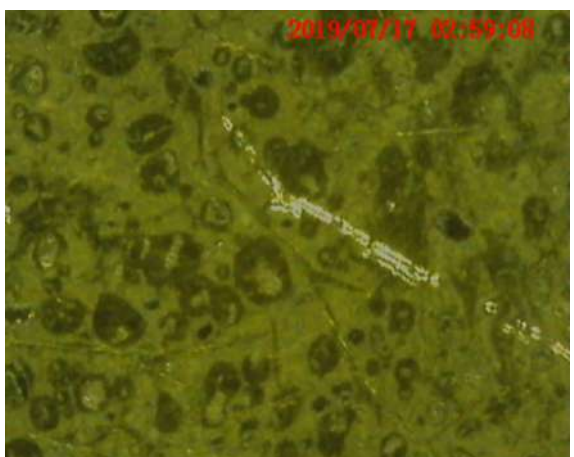


Muestra 4 - cara A

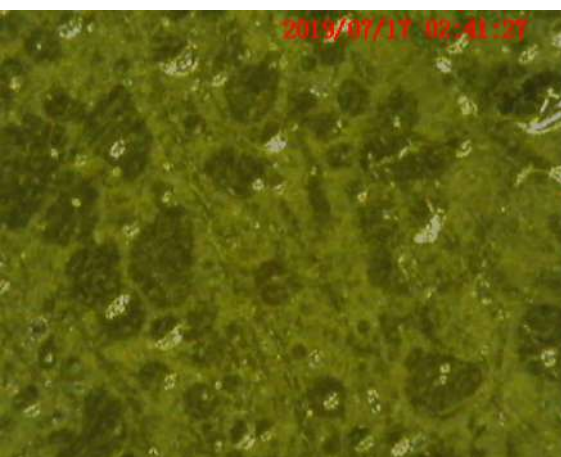


Muestra 5 - cara B

Figura 1.30 Manchones (concentración de “cráteres lunares”)



Muestra 4-cara B – 160X



Muestra 3-cara B – 160X

Figura 1.31 Detalle de ampliación de los manchones

E. Pérdida de material

Debido a la delicadeza de las láminas de pan de oro y al proceso artesanal de su fabricación, estos elementos pueden sufrir pérdida de material con el mínimo contacto que tengan. Es una situación común, ya que además de ser manipuladas en su propia fabricación, al hacer parte de un nuevo elemento (vidrio dorado), pasan por otra serie de procesos que alteran también su composición y generan pérdidas. Dentro de los diferentes factores que generan pérdida de material dorado es posible identificar tres acciones. En la primera serie de imágenes de la figura 1.32 se observa la ausencia de material debido a zonas o áreas de rasgadura, que, si se amplían, se tratan de formas rectas muy definidas generadas por el contacto con la esquina de algún elemento. Si se observa la muestra M6B de la figura 1.33, es la forma más común en que se presenta esta pérdida. Se trata de un triángulo isósceles en donde el vértice de los lados más largos es el punto inicial de contacto desde donde se realiza la rasgadura. En la siguiente serie, se observan una especie de manchas que producen un desgaste debido al contacto superficial con algún elemento. En la última serie de imágenes, aparecen diferentes anomalías (fisuras, quiebres) que también originan pérdida en la composición de las láminas de pan de oro.

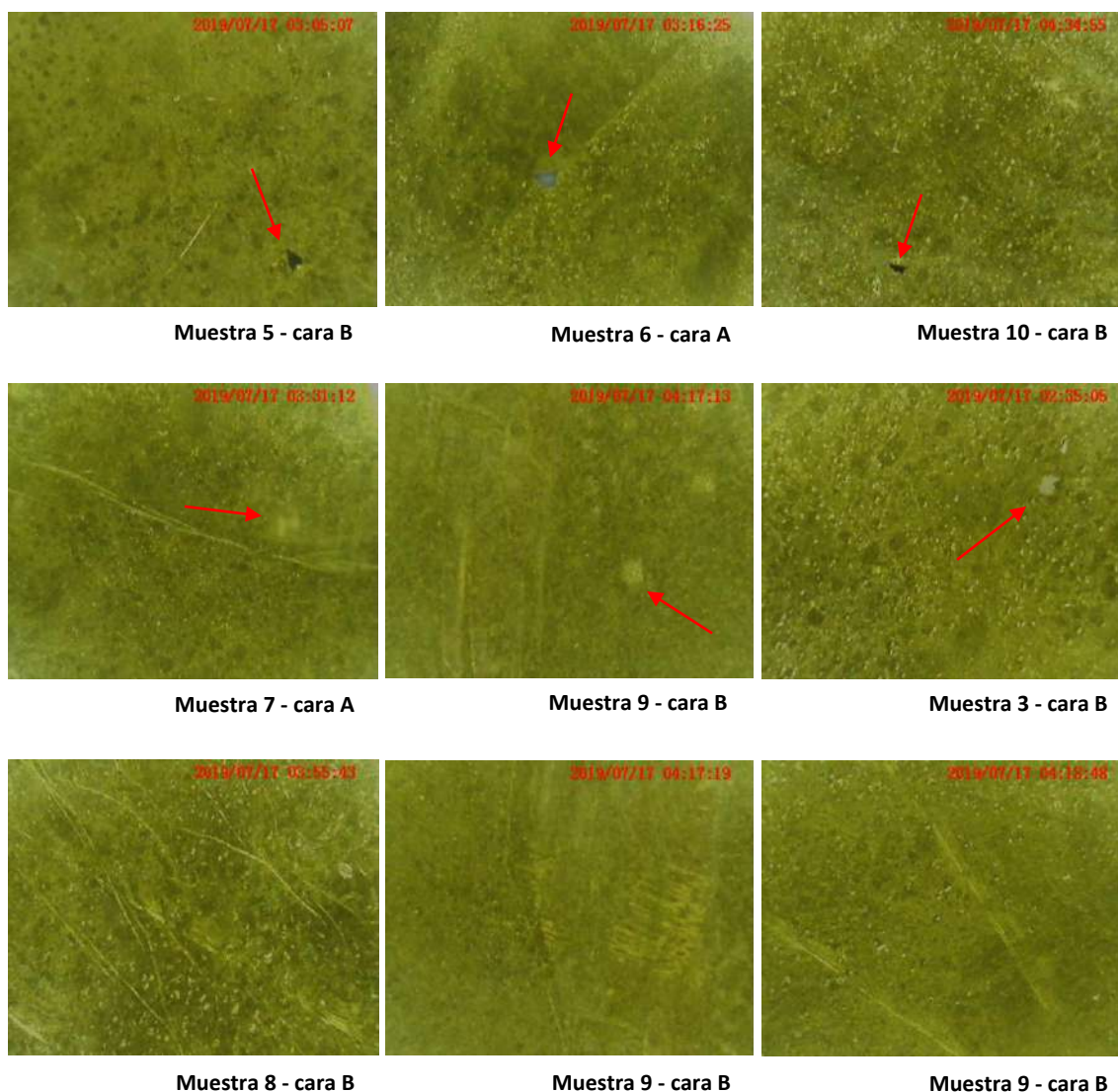
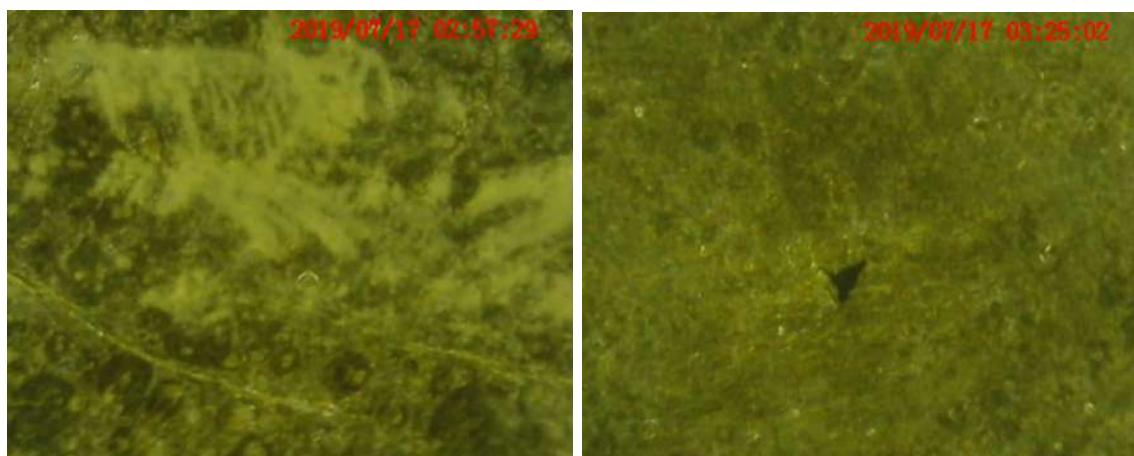


Figura 1.32 Pérdida de material de pan de oro



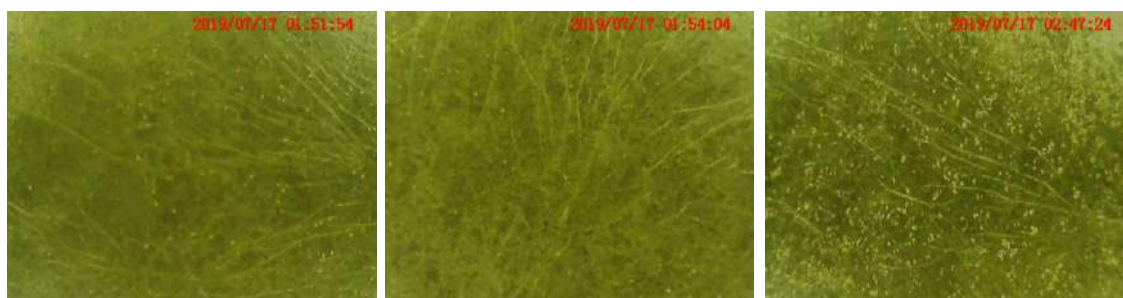
Muestra 4-cara B – 160X

Muestra 6-cara B – 160X

Figura 1.33 Detalle de ampliación de pérdida de material
Izquierda: Pérdida por desgaste, Derecha: pérdida por punto de rasgadura

La pérdida de material es una anomalía que genera una alteración en la composición de las láminas de pan de oro lo que compromete la durabilidad del material y el brillo. El hecho de tener pérdida de material puede ayudar a la aparición de anomalías mucho más graves, pues se rompe la continuidad de los elementos.

F. Estrías



Muestra 1 - cara A

Muestra 1 - cara B

Muestra 4 - cara A

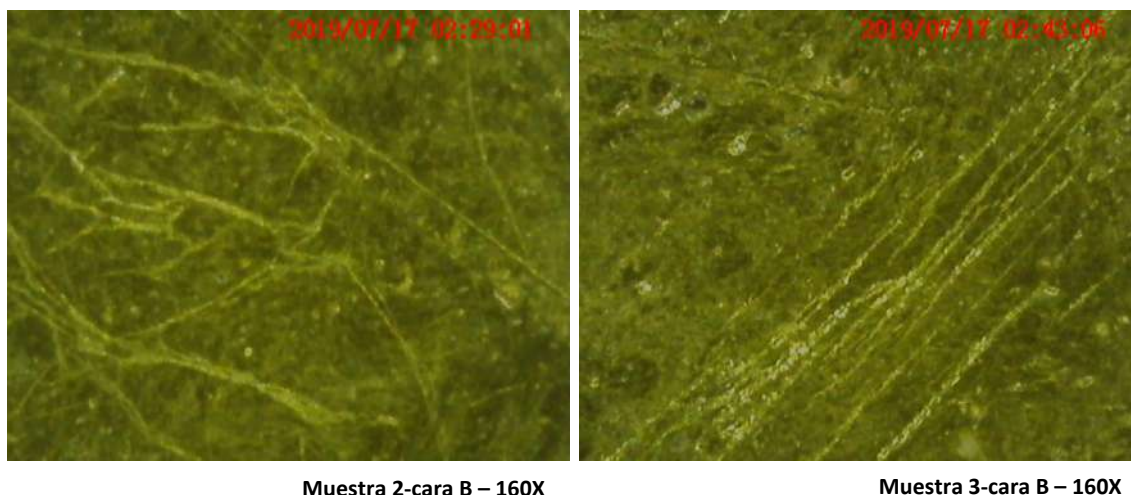


Muestra 10 - cara A

Muestra 10 - cara A

Muestra 8 - cara A

Figura 1.34 Estrías



Muestra 2-cara B – 160X

Muestra 3-cara B – 160X

Figura 1.35 Detalle de ampliación estrías
Izquierda: estrías ramificadas, Derecha: estrías paralelas

Las estrías son una anomalía que se presenta únicamente en las láminas de pan de oro debido a la composición y al proceso de fabricación de estas. La aparición de estrías es muy común y existen múltiples posibilidades en la dirección y el desarrollo de estas. Pueden adquirir un desarrollo radial en donde, a partir de un punto concéntrico, se empiezan a desarrollar las ramificaciones (muestra M1A figura 1.34) o, por el contrario, pueden ser lineales, en donde todas siguen el mismo recorrido (muestra M10A figura 1.34). Las estrías se diferencian de otro tipo de anomalías como los quiebres o las fisuras en que las líneas que parecen van conectadas entre sí y no son aisladas. Se tratan de formas de ramificaciones.

G. Quiebres

Un grupo de anomalías que se suelen confundir con las estrías, pero sobre todo con las fisuras, son los quiebres. Esta anomalía se diferencia de las otras dos por varias razones: la primera, a diferencia de las estrías, es una anomalía que se genera posterior a la fabricación de la lámina de pan de oro, ya que su procedencia viene principalmente de una acción sobre los vidrios de protección. También, aunque se tratan de elementos aislados al igual que las fisuras, en la mayoría de los casos se origina a partir de los bordes y va de extremo a extremo. Posee una profundidad mucho mayor y en la mayoría de ocasiones puede ser consecuencia de un ataque exterior. Esta situación se presenta sobre todo si el vidrio que sufre el ataque es el de menor espesor, porque si fuera el de mayor espesor, se generaría una grieta con la posterior separación de la sección rota. Otra característica que presenta esta anomalía es la alteración del brillo, ya que, al generarse un corte en la sección de los componentes, la incidencia de la luz y el reflejo varían.

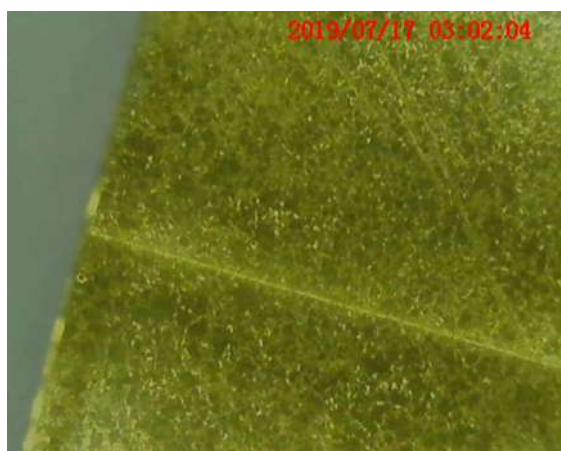
Se trata de una situación de mayor gravedad respecto a las estrías y a las fisuras debido a que puede ocasionar la pérdida parcial o completa de parte de la *piastrella* de vidrio dorado. Además, al originarse en los bordes, puede ser un camino de entrada a diferentes agentes que producen ataques en el interior del vidrio metálico dorado y que a futuro suponen una pérdida completa del pan de oro.



Muestra 4 - cara B



Muestra 4 - cara B



Muestra 5 - cara A



Muestra 5 - cara A

Figura 1.36 Quiebres

H. Fisuras

Si se observan detenidamente las imágenes de las figuras 1.34, 1.36 y 1.37, los diferentes grupos de anomalías guardan algunas similitudes, pero, gracias a la posibilidad de la técnica del microscopio óptico digital, son más claras las diferencias que poseen. Las fisuras son elementos aislados y no ramificados. Cuando aparecen más de una fisura, estas pueden tener la misma dirección o por el contrario seguir direcciones opuestas o incluso cruzarse como sucede en la muestra M5A y M9A de la figura 1.37. Ahora bien, si ponemos en contraste las fisuras con los quiebres, la primera diferencia clara es que los quiebres poseen una profundidad mucho mayor (en ocasiones completa). Es decir, todo el espesor de la lámina lo ha sufrido y pudo haber sido originado desde el exterior. Por el contrario, las fisuras se originan únicamente en las láminas de pan de oro y poseen mucho menos profundidad. Es fácil entender esta situación si se analiza el brillo de cada línea trazada en donde los quiebres poseen un reflejo mayor, símbolo de un corte más profundo.



Muestra 3 - cara B



Muestra 5 - cara A



Muestra 5 - cara A



Muestra 9 - cara A

Figura 1.37 Fisuras

6.1.1.4.2. Anomalías en las caras exteriores de vidrios de protección

Cara A Zoom 160X / Cara B - Zoom 160X

Como ya hemos visto, las anomalías se pueden presentar en las diferentes capas del vidrio metálico dorado y con diferentes grados de riesgo. Las anomalías presentes en el interior de las capas son las que deben tener mayor atención y control. Sin embargo, no son más importantes que las que se presentan en la superficie de los vidrios de protección. Estos, al estar expuestos al exterior, reciben diferentes tipos de ataque, por lo cual el grado de riesgo de las anomalías que se presentan en las superficies al llegar desde fábrica, determinará la durabilidad cuando el elemento cumpla su función en servicio (resistencia a fenómenos ambientales).

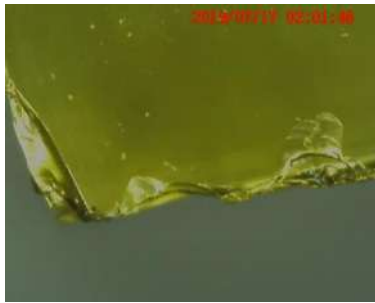
Al utilizar el microscopio con un zoom de 160X, los resultados que se observan son fenómenos que afectan directamente a la superficie de los vidrios exteriores. El tener esta aproximación ampliada de las anomalías de la superficie de los vidrios, permite el entendimiento del grado de afectación de cada acción sobre la superficie.

Dentro de las diferentes anomalías que se presentan en las superficies de los vidrios de protección, existen algunas que se extienden hasta las láminas de pan de oro e incluso superan todas las capas. Es el caso de la pérdida de bordes y esquinas. Si se observa la muestra M7B de la figura 1.38, es posible entender que esta anomalía se origina desde el exterior. El ataque lo reciben primero los vidrios de protección, los cuales, al estar expuestos, empiezan perdiendo parte del espesor de sus capas. Posteriormente, la acción llega a las capas interiores en donde al perder la protección del vidrio empieza un ataque contra la lámina dorada (muestra M8B figura 1.38) y, por último, se genera la pérdida completa de un vidrio de protección y de la lámina de pan de oro (muestra M6B figura 1.38). Este tipo de situaciones suelen generarse cuando la acción mecánica se presenta sobre el vidrio de menor espesor. En la mayoría de los casos que se presentan sobre el vidrio de mayor espesor, la pérdida de bordes y esquinas no va más allá de la pérdida parcial del espesor de algunas capas del vidrio (muescas/decapado).

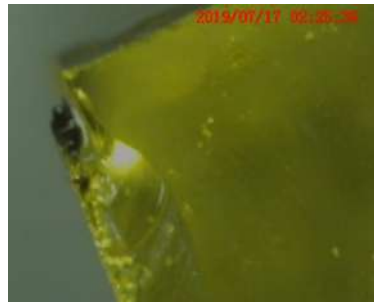
En otras ocasiones, y dependiendo de la fuerza del impacto, se genera la pérdida de todas las capas, incluso de las del vidrio de protección de mayor espesor. Las esquinas resultan ser las zonas más propensas a sufrir estos ataques, ya que concentran las tensiones generadas en todo el vidrio. Los bordes también suelen sufrir pérdida de material debido, sobre todo, al contacto con otro tipo de elementos de naturaleza más dura. Esta pérdida se genera en mayor o menor proporción de acuerdo a dos razones principalmente: la primera, la forma de corte y acabado de la *piastrella* y, la segunda, el espesor del vidrio y la superficie de contacto.

Estas anomalías generan dos niveles de afectación que pueden alterar la durabilidad y el comportamiento de los componentes. En un primer grado, se altera el brillo porque al generarse un corte, los ángulos se modifican y las reflexiones de la luz se alteran. Un segundo grado, de mayor atención, es la pérdida del material de protección. Es un punto de inflexión desde donde empieza a deteriorarse el material. Es una anomalía que permite la entrada de diferentes agentes externos, ya que ha perdido su protección y se ponen en riesgo las láminas de pan de oro.

A. Pérdida de bordes y esquinas



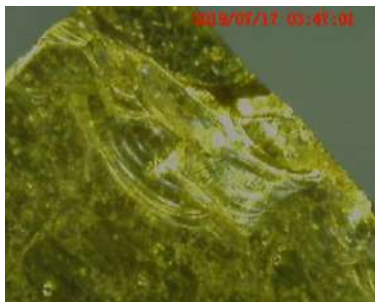
Muestra 1 - cara A



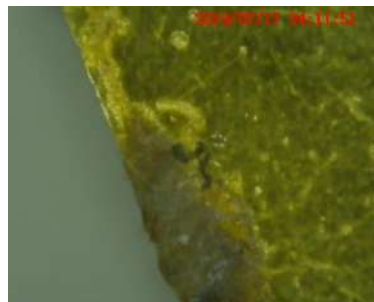
Muestra 2 - cara A



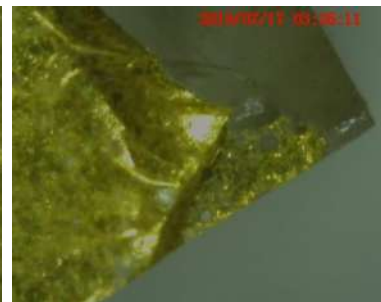
Muestra 7 - cara A



Muestra 7 - cara B



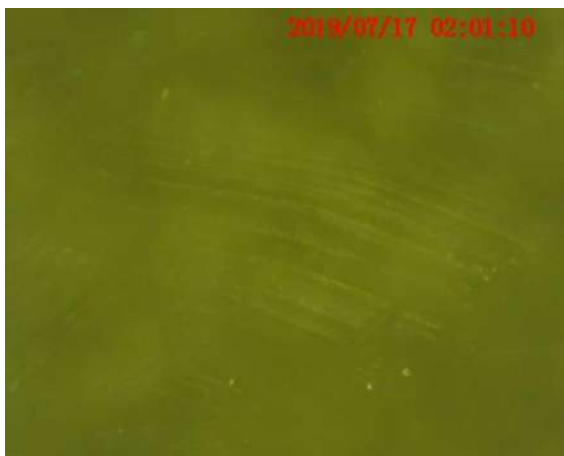
Muestra 8 - cara B



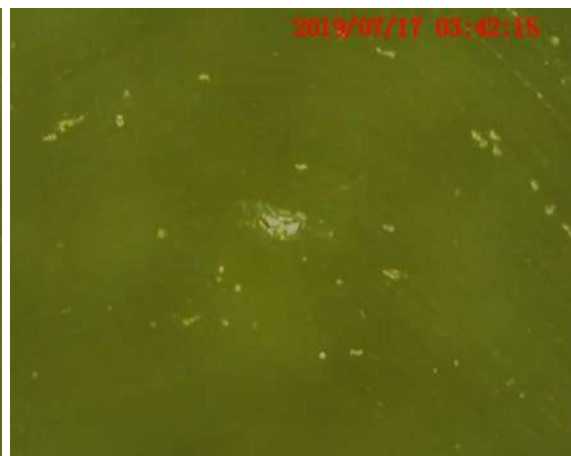
Muestra 6 - cara B

Figura 1.38 Pérdida de bordes y esquinas

B. Suciedad



Muestra 1 - cara A



Muestra 7 - cara A

Figura 1.39 Suciedad

El grado de afectación de esta anomalía depende de la composición del material que origina la suciedad y de la rugosidad del vidrio, ya que, a mayor rugosidad, mayor posibilidad de que se adhieran fragmentos de cualquier tipo de materia. Dentro de la afectación se pueden alterar tanto el brillo como la resistencia (durabilidad). Las muestras analizadas no poseen grandes zonas de suciedad, sin embargo, al frotar la superficie con el dedo, se dejan rastros de suciedad lo cual conlleva a pensar que no se trata de una superficie muy lisa.

C. Picaduras

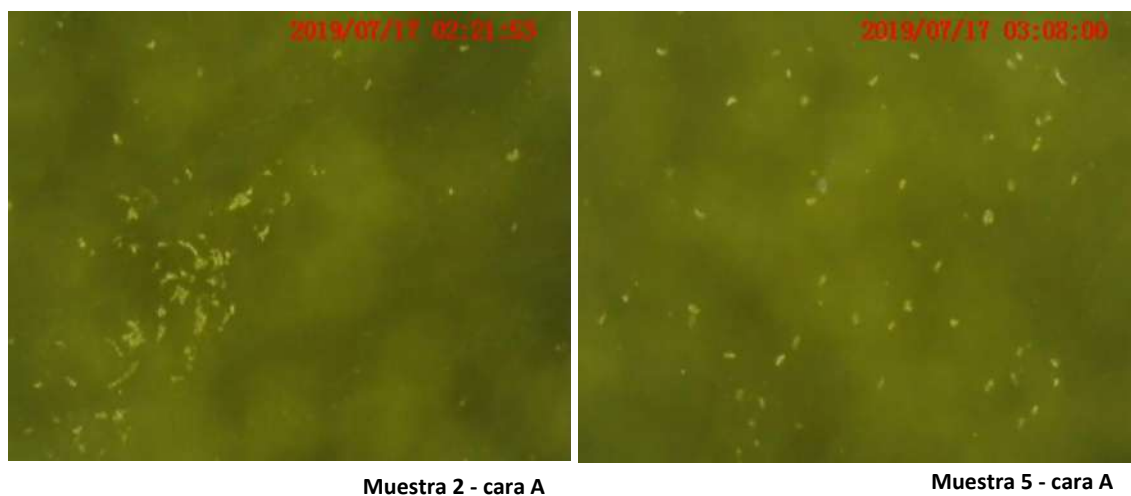


Figura 1.40 Picaduras

Si se observasen las *piastrelle* de vidrio metálico dorado sin ningún tipo de equipo, a simple vista, no sería fácil identificar si este defecto se trata de una burbuja entre capas o de una picadura en la superficie. Pero al hacer una inspección más ampliada, si se observan las figuras 1.28, 1.29 y 1.40, las diferencias son evidentes. Los puntos blancos o burbujas poseen una forma que da origen a su nombre y como se ha mencionado anteriormente se ubican entre capas o en los mismos vidrios. Por el contrario, las picaduras se encuentran en la superficie exterior y se generan posteriormente. Las picaduras también pueden confundirse con las raspaduras de la superficie de los vidrios (figura 1.42), pero la diferencia radica en que las picaduras son elementos más aislados, menos concentrados y además no dejan rastro de trayectoria como sucede en una raspadura.

Las picaduras pueden variar en función de la fuerza e instrumento con el cual se ha afectado la superficie del vidrio. Estos dos factores (fuerza e instrumento) traen como resultado los diversos tamaños y la profundidad de las picaduras. Aunque las imágenes de la figura 1.40 y 1.41, ambas se tratan de picaduras, se realiza una diferenciación, debido a que el tamaño de las segundas es significativamente mayor.

La principal afectación de las picaduras depende de su profundidad y de su tamaño, ya que pueden haber diferentes agentes externos que las aprovechen para incrustarse en los poros abiertos de las superficies y desde estos puntos inicie un ataque que afecte a toda la *piastrella*.

Lo ideal de una superficie en el vidrio es que sea totalmente lisa para poder así proteger al conjunto de las infiltraciones de cualquier tipo de materia externa agresiva, pero como se observa en las diferentes muestras, es una situación que no se suele presentar debido a todos los procesos por los que pasa este producto.

D. Picaduras mayores

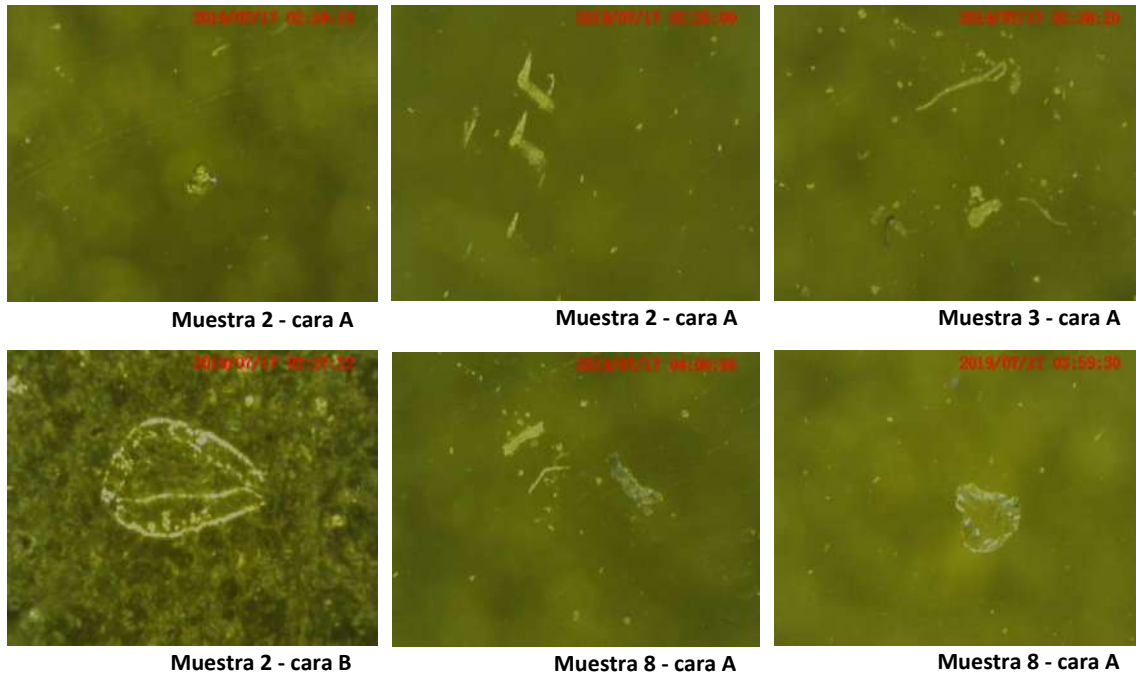


Figura 1.41 Picaduras mayores

E. Raspaduras

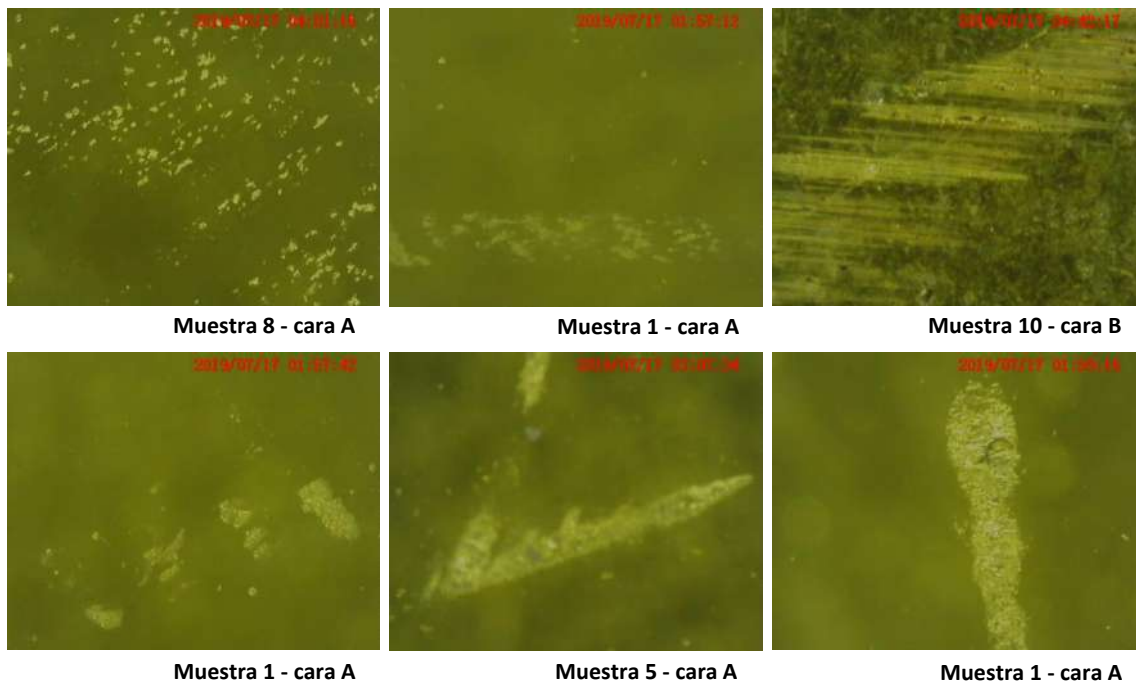


Figura 1.42 Raspaduras

Existen dos tipos de anomalías que poseen algunas características similares a las picaduras, pero que se pueden diferenciar gracias a este análisis detallado. Las raspaduras se diferencian en que se trata de una marca con líneas más juntas, que crean un grupo y afectan de una manera mayor la transparencia aparente del vidrio. Es una anomalía que además de abarcar una zona más amplia debido a la concentración de líneas, deja un rastro de la dirección y del sentido con el cual el instrumento ha hecho contacto con la superficie. La profundidad, la forma y la dirección,

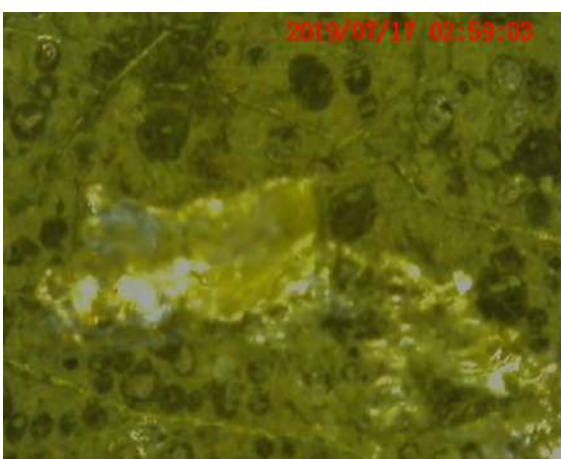
al igual que en las picaduras, dependerá de la dureza del objeto o instrumento con el cual haya tenido contacto la superficie y la fuerza con la que se imprimió. En la figura 1.42 se pueden observar diferentes patrones de raspadura en los cuales se evidencian las características ya nombradas. Es una anomalía muy extendida que probablemente se origine posteriormente a los procesos de fabricación. Algunas raspaduras se originan por roce y otras por impacto.

La siguiente anomalía que se suele confundir sobre todo con las raspaduras son las hendiduras. La principal diferencia entre estas dos anomalías es que la hendidura probablemente se ocasiona en algún momento del proceso de fabricación del vidrio. Se caracteriza por tratarse de una marca continua y lisa (no rugosa como la raspadura) que afecta la planicidad de la superficie y visualmente altera sobre todo el brillo debido a la incidencia de la luz sobre los diferentes ángulos de la hendidura. Esta anomalía, a pesar de afectar al brillo, posee menos riesgos respecto a las dos anteriores anomalías, ya que, al tratarse de una alteración dentro del proceso de fabricación, ha quedado sellada y protegida por las altas temperaturas del horno. Las formas de estas anomalías dependen sobre todo del momento en el cual la anomalía se ha originado (figura 1.43).

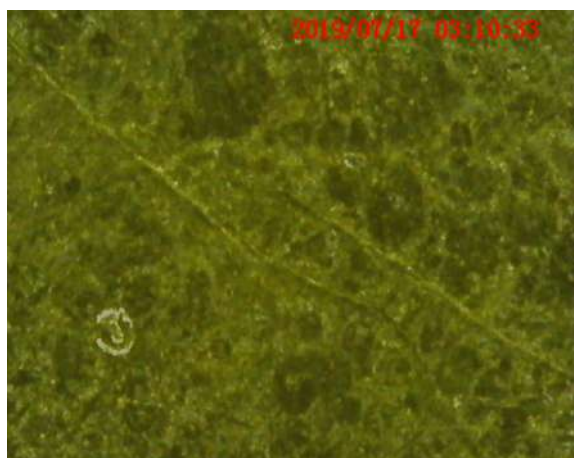
F. Hendiduras



Muestra 4 - cara B



Muestra 4 - cara B



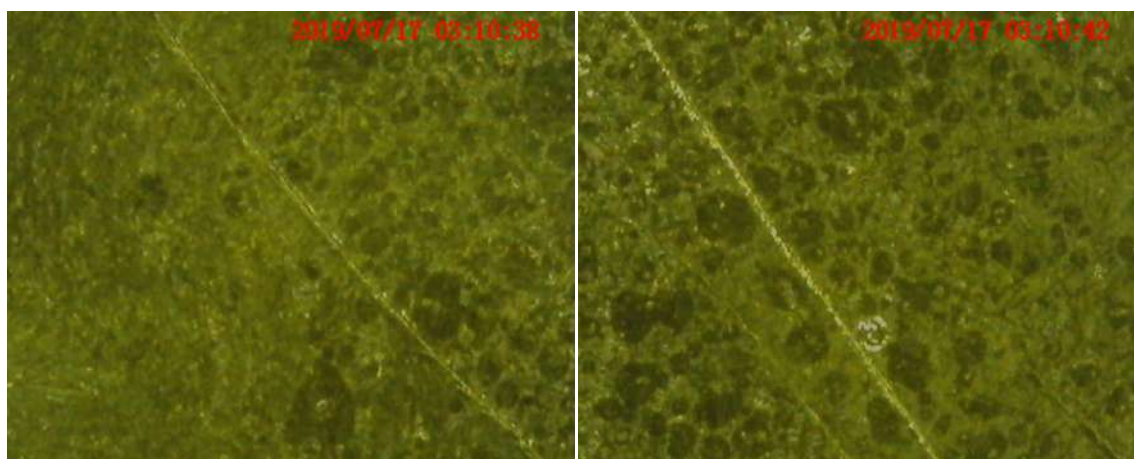
Muestra 5 - cara B



Muestra 10 - cara A

Figura 1.43 Hendiduras

G. Quiebres



Muestra 5 - cara B

Muestra 5 - cara B

Figura 1.44 Quiebres

La relación que poseen las dos últimas anomalías identificadas dentro del análisis del material (quiebres y rayones) es que probablemente se originan posterior a la fabricación del vidrio metálico dorado. Las dos anomalías pueden tener diferentes grados de riesgo de acuerdo con la profundidad con la cual se hayan visto afectadas. Sin embargo, los quiebres, suelen ser de mayor gravedad, pues, al tratarse de una rotura parcial o total de un vidrio de protección, todos los componentes interiores del vidrio metálico dorado quedan. Esta lesión se origina sobre todo desde los bordes y lo más próximo a las esquinas ya que son las zonas con mayor tensión recibida durante el proceso de fabricación. Los quiebres son una anomalía que se presenta tanto en la superficie de los vidrios de protección como en las diferentes capas del vidrio metálico dorado y, principalmente, se generan desde el exterior.

Los rayones, por su parte, se diferencian de las raspaduras en que se tratan de líneas únicas y aisladas. Estas líneas pueden poseer diferentes espesores dependiendo del instrumento y la fuerza que se haya empleado (figura 1.45). De igual forma que en las anomalías anteriores, los factores de riesgo son directamente proporcionales con la profundidad de la lesión, ya que se pueden filtrar diferentes agentes externos en el interior del vidrio y de las capas, lo que ocasionaría ataques de mayor gravedad.

H. Rayones



Muestra 1 - cara A

Muestra 1 - cara A

Muestra 2 - cara A



Muestra 1 - cara B



Muestra 2 - cara A



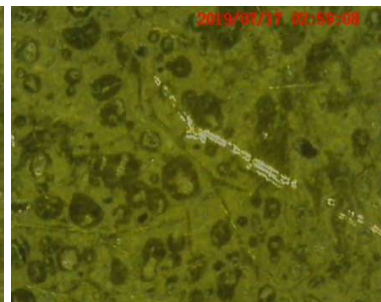
Muestra 6 - cara B



Muestra 8 - cara B



Muestra 7 - cara B



Muestra 4 - cara B

Figura 1.45 Rayones

6.1.2. *Piastrelle* sometidas a ensayos básicos de laboratorio (análisis cuantitativo)

Los ensayos de laboratorio permiten poder aproximarse cada vez más a la realidad de los materiales con el fin de dar un valor cuantitativo a cada elemento. Los valores obtenidos, por lo general, se obtienen a partir de escalas de valores ya conformadas en diferentes ensayos a lo largo del tiempo.

Las muestras que serán expuestas son traídas directamente de la fábrica de Orsoni, teniendo las mismas características que ya se han descrito en el apartado anterior.

A continuación, se detallan algunos datos para los ensayos realizados:

Fecha de entrega material: 01/03/2019

Material entregado: muestras de vidrio metálico dorado de Murano.

Ensayos solicitados:

- Determinación de la absorción de agua, porosidad abierta, densidad relativa aparente y densidad aparente. UNE-EN ISO 10545-3:2018.
- Determinación de la resistencia a la flexión y carga de rotura. UNE-EN ISO 10545-4:2015.
- Determinación de la resistencia química. UNE-EN ISO 10545-13:2017.
- Determinación de la resistencia a las manchas. UNE-EN ISO 10545-14:2015.
- Determinación de la resistencia al choque térmico. UNE-EN ISO 10545-9:2013.
- Determinación de la resistencia a la abrasión superficial de baldosas esmaltadas. UNE-EN ISO 10545-7:1999.
- Determinación de la dureza al rayado según Mohs. UNE 67101:1985 y 67101/1M:1992. (normas anuladas y obsoletas, pero actualmente no hay ninguna que la reemplace)
- Determinación de la dilatación térmica lineal. UNE-EN ISO 10545-8:2014.
- Determinación de la resistencia a la helada. UNE-EN ISO 10545-12:1997.

Fecha de realización de los ensayos: 04/03/2019-22/03/2019

Norma general utilizada para la muestra: baldosa cerámica - 10545²⁹

Composición muestras: detallado en el apartado 4.1.1

Características de las muestras: características detalladas en el apartado 9.1.1

Los diferentes laboratorios acreditados para realizar este tipo de pruebas basan sus ensayos en diferentes normativas. En este caso, la normativa utilizada para realizar el procedimiento ha sido la norma UNE-EN ISO 10545, que corresponde a las baldosas cerámicas- Es decir, el vidrio metálico dorado se ha valorado como si fuera un elemento de cerámica.

Al realizar una investigación sobre los materiales que se valoran en la norma UNE, el vidrio metálico dorado podría asemejarse mucho más a las características de un espejo que a las de una baldosa cerámica. En primer lugar, para poder comparar el vidrio dorado con cualquier otro tipo de elemento, hay que entender que se trata de un vidrio compuesto³⁰. Si se analizan las diferentes componentes de un espejo, se llega a la conclusión de que también se trata de un vidrio compuesto. Ambos elementos, tanto el vidrio metálico dorado como el espejo, inician su

²⁹ Norma UNE-EN ISO

³⁰ El término de vidrio compuesto hace relación a un vidrio que posee más de una capa. Ver apartado 4.1.1

composición a partir de un vidrio transparente³¹, los dos poseen una capa o varias capas metálicas (el espejo una capa de estaño, una capa de plata³² y una capa de cobre). Tienen elementos que forman un *sándwich* en donde en una de sus caras se coloca un vidrio de mayor espesor, en el medio van las capas metálicas y la otra cara está conformada por otro elemento de protección (en el vidrio metálico dorado es un vidrio soplado de poco espesor y en el espejo, dos capas de pintura). Además de las características anteriores, también guardan similitud en cuanto a que los dos buscan crear grandes áreas de reflejo.

Realizado este análisis, sería muy positivo el plantearse poder valorar las *piastrelle* de vidrio metálico dorado siguiendo la norma UNE-EN 1036 para *Espejos de vidrio recubierto de plata para uso interno* mientras aparece una norma que se ajuste mucho más a un vidrio metálico compuesto para revestimiento exterior. El vidrio metálico dorado, a priori, cumple las características que la norma especifica: vidrio de silicato sodocálcico, plano, transparente, incoloro o coloreado, con caras paralelas y pulidas, cuya cara trasera está recubierta con un depósito reflectante de plata protegida (en el caso del vidrio dorado, la lámina de pan de oro) y, además, está entre los 2 y los 10mm permitidos. Mientras el vidrio metálico dorado cumple con las características de un espejo, no cumple con dos de las características básicas de las baldosas cerámicas: no son fabricados ni por extrusión, ni por prensado, y no poseen ningún tipo de acabado posterior (esmalte, engobe o pulido).

Es verdad que la norma UNE-EN 1036-1 aclara: “*Esta norma europea no es de aplicación para los espejos de vidrio plateado utilizados en atmosferas agresivas y/o en atmosferas de elevada y constante humedad...Esta norma europea no es aplicable a los vidrios reflectantes utilizados en vidriería exterior.*”, porque está prevista para ser utilizada en elementos de mayores dimensiones y que además estarán suspendidos. El vidrio metálico dorado no cumple ninguna de estas dos últimas condiciones: las dimensiones son pequeñas debido a que es un producto que se debe fragmentar para crear las teselas de *trencadís* y, además, no va suspendido, sino que va soportado sobre una base de mortero.

Después de realizada la anterior sugerencia sobre la utilización de otra normativa para el análisis de las *piastrelle* de vidrio metálico dorado, es necesario indicar porque se utilizó la norma UNE-EN ISO 10545 para cerámica. Como ya se ha aclarado, cada empresa al estar certificada realiza las pruebas bajo la norma que creen pertinente. Se han realizado siguiendo esta normativa, ya que las *piastrelle* de vidrio metálico dorado hacen parte del grupo de elementos de revestimiento los cuales normalmente se analizan bajo la normativa de la cerámica.

Para poder realizar la lectura de los resultados de los ensayos a los cuales fueron sometidas las muestras, es importante tener identificados los diferentes grupos y características de los tipos de baldosa cerámica. Hacer esta identificación permitirá poder englobar las *piastrelle* de vidrio metálico dorado en un grupo determinado de baldosa cerámica.

Las baldosas cerámicas se clasifican de acuerdo al modelo y a la absorción de agua como se observa en la ficha 1.1. Existen 3 grupos en función de la absorción (I, II y III) y 2 en función del modelo de fabricación (extruidas o prensadas). (VALENCIANA, 2011)

³¹ La utilización del vidrio para conformar el espejo se inicia en Venecia en el S. XIV

³² La aplicación de una capa de plata en el reverso de vidrio fue implementada por el químico Justus von Liebig en 1835

GRUPOS DE BALDOSAS CERÁMICAS					
		GRUPO I E ≤ 3%	GRUPO IIa 3% < E ≤ 6%	GRUPO IIb 6% < E ≤ 10%	GRUPO III E > 10%
TIPO DE MODELO	BALDOSAS EXTRUIDAS	La absorción de agua es muy baja (E < 0.5%)	Absorción de agua media - baja	Absorción de agua media - alta	Absorción de agua alta
	BALDOSAS PRENSADAS EN SECO	Absorción de agua baja (0.5% < E < 3%)	Absorción de agua media - baja	Absorción de agua media - alta	Absorción de agua alta

Ficha 1.1. Clasificación de las baldosas cerámicas

La clasificación de las baldosas cerámicas será de ayuda a la hora de enmarcar los resultados de absorción de agua del vidrio metálico dorado. Los tipos de modelo en este caso no son útiles, pues el vidrio metálico dorado no se fabrica mediante ninguno de los dos sistemas de clasificación. En cambio, serán de mayor ayuda las características técnicas de los tipos de baldosa cerámica más comunes en España, ya que permiten aproximarse a las características y resultados del comportamiento del vidrio metálico dorado a alguno de los elementos cerámicos de referencia.

CARACTERÍSTICAS DE LOS TIPOS DE BALDOSA CERÁMICA MÁS COMUNES									
Baldosa cerámica	Medidas usuales (cm)	Grosor usual (mm)	Tipos	Absorción de agua (%)	Carga de rotura (N)	Abrasion GL (mm³)	Abrasión UGL (mm³)	Resistencia a la helada	Resistencia química
Azulejo	10x10 - 45x60	< 10	/	11 a 15	300 a 1200	variable	/	no	variable
Gres esmaltado	10x10 - 60x60	> 8	/	2 a 6	1000 a 2300	variable	/	si-no	variable
Gres porcelánico	15x15 - 60x120	> 8	UGL	< 0.1	1800 a 5200	/	110-160	si	si
			GL	< 0.5			variable		variable
Baldosín catalán	13x13 - 24x40	< 8	/	Gran dispersión	500 a 1800	/	700-900	no	variable
Gres rústico	11.5x11.5 - 45x45	> 10	/	1.5 a 6	2200 a 4500	/	240-400	si-no	si
Barro cocido	Gran dispersión	> 10	/	6 a 15	2300 a 3200	variable	300-800	no	variable

Ficha 1.2. Características de los tipos de baldosa cerámica más comunes

A continuación, se expone el análisis de los resultados entregados por la empresa APPLUS sobre los ensayos realizados a las muestras de *piastrelle* entregadas.

6.1.2.1. Ensayo para la determinación de la absorción de agua, porosidad abierta, densidad relativa y densidad aparente. UNE-EN ISO 10545-3:2018

Muestra	pesos (g)			Absorción de agua (%)	Porosidad aparente (%)	Densidad relativa aparente	Densidad aparente (g/cm3)
	Seco	Saturado	Saturado sumergido				
1	95,8	95,8	57,6	0,00	0,00	2,51	2,51
2	95,4	95,5	57,4	0,01	0,03	2,51	2,51
3	99,0	99,1	59,5	0,01	0,03	2,50	2,50
4	96,8	96,8	58,2	0,01	0,03	2,51	2,51
5	98,5	98,5	59,2	0,00	0,00	2,51	2,51
Valores Medios:				0,01	0,02	2,51	2,51

Ficha 1.3. Resultados ensayo para determinar absorción de agua, porosidad abierta, densidad relativa y aparente

Los resultados de los valores medios de cinco muestras sometidas a los ensayos de absorción de agua, porosidad abierta, densidad relativa y densidad en un equipo de impregnación al vacío dan como resultado que el vidrio dorado metálico se trata un producto casi cero absorbente y cero poroso. Si se pudiera comparar su característica de absorción del agua con alguna de las baldosas cerámicas más comunes sería con el gres porcelánico, ya que posee una absorción menor a 0.5% (ver ficha 1.4). Pero, por el contrario, si se busca una baldosa cerámica en función de la porosidad³³, el elemento cerámico al que más se acercaría sería al gres esmaltado. La densidad es la común en un vidrio (2.5 g/cm3).

	Baldosa cerámica	Medidas usuales (cm)	Grosor usual (mm)	Tipos	Absorción de agua (%)
	Azulejo	10x10 - 45x60	< 10	/	11 a 15
porosidad	Gres esmaltado	10x10 - 60x60	> 8	/	2 a 6
Absorción de agua	Gres porcelánico	15x15 - 60x120	> 8	UGL	< 0.1
				GL	< 0.5
	Baldosín catalán	13x13 - 24x40	< 8	/	Gran dispersión
	Gres rústico	11.5x11.5 - 45x45	> 10	/	1.5 a 6
	Barro cocido	Gran dispersión	> 10	/	6 a 15

Ficha 1.4. Absorción de agua y dimensiones de las baldosas cerámicas más comunes

³³ La porosidad se obtiene del porcentaje de absorción de agua sobre el peso total de a baldosa

6.1.2.2. Ensayo para determinar la resistencia a flexión y la carga de rotura. UNE-EN ISO 10545-4:2015

Muestra	Distancia entre ejes (mm)	Anchura (mm)	Grueso (mm)	Carga de rotura (N)	Fuerza de rotura (N)	Resistencia flexión N/mm ²
1	70,24	80,2	5,8	2070	1813	80,6
2	70,24	80,2	5,8	2498	2188	98,6
3	70,24	80,2	6,0	1776	1555	64,4
4	70,24	80,2	6,0	2847	2493	103,9
5	70,24	80,2	5,9	1850	1620	69,8
6	70,24	80,2	6,0	2430	2128	87,8
7	70,24	80,2	6,0	2362	2069	86,8
Valores Medios:				2262	1981	84,5

Ficha 1.5. Resultados ensayo para determinar la resistencia a flexión y la carga de rotura

Los ensayos se realizan sobre 7 *piastrelle* de muestra de vidrio dorado y dan como resultado una carga a rotura de 2262N. La carga a flexión se aplicó con el vidrio metálico dorado colocado con el vidrio de mayor espesor hacia arriba. Al ver la ficha 1.6 con los valores de carga de rotura de las baldosas cerámicas más comunes en España, observamos que la resistencia a rotura de las *piastrelle* se puede asemejar al gres rústico y está en el límite del gres esmaltado. Por otro lado, la resistencia a flexión de 84,5 N/mm² se acerca mucho a los 100 N/mm² que tiene un vidrio templado laminado de resistencia a flexión y en cambio, está muy por encima de los 40 N/mm² de resistencia a flexión de un vidrio recocido (www.vitralba.com, 2019)³⁴. El vidrio metálico dorado, al ser un vidrio compuesto, posee varios elementos que aportan resistencia a las diferentes acciones. La resistencia a flexión se aproxima mucho al vidrio templado laminado, ya que la lámina de pan de oro y el vidrio soplado que se encuentra en la cara opuesta, se asemejan a la función que realiza el film de PVM en los vidrios laminados.

Baldosa cerámica	Medidas usuales (cm)	Grosor usual (mm)	Tipos	Absorción de agua (%)	Carga de rotura (N)
Azulejo	10x10 - 45x60	< 10	/	11 a 15	300 a 1200
Gres esmaltado	10x10 - 60x60	> 8	/	2 a 6	1000 a 2300
Gres porcelánico	15x15 - 60x120	> 8	UGL	< 0.1	1800 a 5200
			GL	< 0.5	
Baldosín catalán	13x13 - 24x40	< 8	/	Gran dispersión	500 a 1800
Gres rústico	11.5x11.5 - 45x45	> 10	/	1.5 a 6	2200 a 4500
Barro cocido	Gran dispersión	> 10	/	6 a 15	2300 a 3200

Ficha 1.6. Carga de rotura de las baldosas cerámicas más comunes

³⁴ Los datos que aparecen en la página web están en daN/cm².

6.1.2.3. Ensayo para determinar la resistencia química. UNE-EN ISO 10545-13:2017

ensayo	clase	Observaciones
cloruro amónico de 100 g/l	A	Sin efectos visibles. Clasificación según ensayo raya de lápiz. La raya de lápiz se elimina con un trapo húmedo

Ficha 1.7 Clasificación para los productos domésticos de limpieza – tiempo de contacto 24h

ensayo	clase	Observaciones
hipoclorito sódico de 20 mg/l	A	Sin efectos visibles. Clasificación según ensayo raya de lápiz. La raya de lápiz se elimina con un trapo húmedo

Ficha 1.8 Clasificación para sales de piscina – tiempo de contacto 24h

ensayo	clase	Observaciones
ácido clorhídrico al 3% (v/v)	LA	Sin efectos visibles. Clasificación según ensayo raya de lápiz. La raya de lápiz se elimina con un trapo húmedo
ácido cítrico de 100 g/l	LA	Sin efectos visibles. Clasificación según ensayo raya de lápiz. La raya de lápiz se elimina con un trapo húmedo
hidróxido potásico de 30 g/l	LA	Sin efectos visibles. Clasificación según ensayo raya de lápiz. La raya de lápiz se elimina con un trapo húmedo

Ficha 1.9 Clasificación para ácidos y bases – concentraciones débiles – tiempo de contacto 4 días (24 horas para el ácido cítrico)

ensayo	clase	Observaciones
ácido clorhídrico al 18% (v/v)	HA	Sin efectos visibles. Clasificación según ensayo raya de lápiz. La raya de lápiz se elimina con un trapo húmedo
ácido láctico al 5% (v/v)	HA	Sin efectos visibles. Clasificación según ensayo raya de lápiz. La raya de lápiz se elimina con un trapo húmedo
hidróxido potásico de 100 g/l	HA	Sin efectos visibles. Clasificación según ensayo raya de lápiz. La raya de lápiz se elimina con un trapo húmedo

Ficha 1.10 Clasificación para ácidos y bases – concentraciones fuertes – tiempo de contacto 4 días

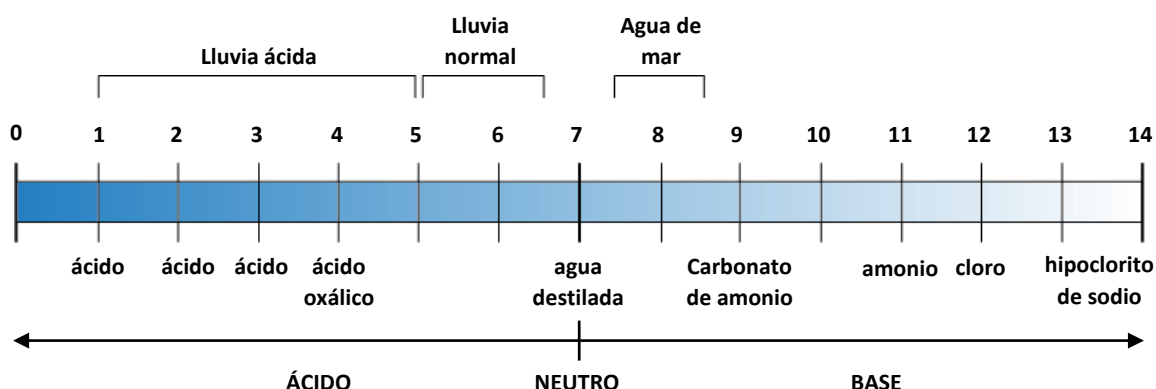


Figura 1.1 Escala de valores pH

Las probetas fueron sometidas a diferentes soluciones químicas por contacto superficial con diferentes tiempos de contacto y como resultado se obtiene una clase A que corresponde a la mayor resistencia a ataques químicos de la norma UNE. El tiempo de contacto ha sido de 4 días, por lo cual no se observan grandes comportamientos como se esperaría que sucediera con el hidróxido potásico.

6.1.2.4. Ensayo para determinar la resistencia a las manchas. UNE-EN ISO 10545-14:2015

Muestra	clase	Observaciones
1	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)
2	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)
3	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)
4	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)
5	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)

Ficha 1.11 Manchas que dejan rastro - Agente de manchas verde en aceite ligero (Cr2O3)

Muestra	clase	Observaciones
1	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)
2	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)
3	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)
4	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)
5	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)

Ficha 1.12 Manchas que producen una acción química oxidante (I)

Muestra	clase	Observaciones
1	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)
2	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)
3	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)
4	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)
5	5	Eliminación de la mancha con el procedimiento de limpieza A (Mancha eliminada con agua caliente corriente durante 5 minutos)

Ficha 1.13 Manchas que forman película (aceite de oliva)

Las muestras de vidrio dorado han sido sometidas a ensayos por contacto durante 24 horas con tres tipos de agentes que producen manchas obteniendo una calificación de clase 5, lo que quiere decir que el método de limpieza para retirar las manchas ha sido el más simple³⁵. Hay que aclarar que los ensayos se realizaron sobre el vidrio de mayor espesor únicamente. De haberse realizado también sobre el vidrio de menor espesor, es posible que los resultados hubieran variado.

³⁵ Método de limpieza A según la Norma UNE-EN

6.1.2.5. Ensayo para determinar la resistencia a choque térmico. UNE-EN ISO 10545-9:2013

Absorción	≤10%
Ensayo	con inmersión
Muestra	Resultados
1	La probeta se agrieta en el primer ciclo al colocarla a baja temperatura, y se rompe en el segundo ciclo al colocarla a baja temperatura
2	La probeta se agrieta en el primer ciclo al colocarla a baja temperatura, y se rompe en el segundo ciclo al colocarla a baja temperatura
3	La probeta se agrieta en el primer ciclo al colocarla a baja temperatura, y se rompe en el segundo ciclo al colocarla a baja temperatura
4	La probeta se agrieta en el primer ciclo al colocarla a baja temperatura, y se rompe en el segundo ciclo al colocarla a baja temperatura
5	La probeta se agrieta en el primer ciclo al colocarla a baja temperatura, y se rompe en el segundo ciclo al colocarla a baja temperatura

Ficha 1.14 Resultado del ensayo para determinar la resistencia a choque térmico

Las 5 *piastrelle* de muestra preparadas para ser sometidas a diez ciclos de variación de temperatura mediante inmersión de entre 15°C y 145°C, comienzan a agrietarse rápidamente en el segundo ciclo, aunque la mayor parte de ellas permanece unida. Ya en el tercer ciclo, empiezan a desprenderse trozos formando piezas como si se tratasen de teselas de *trencadís*. Es importante anotar que el vidrio metálico dorado, al tener un elemento metálico entre sus capas (aunque sea muy sutil), posee una cohesión que ayuda a mantener unido el conjunto a pesar de que los dos vidrios se hayan agrietado³⁶.

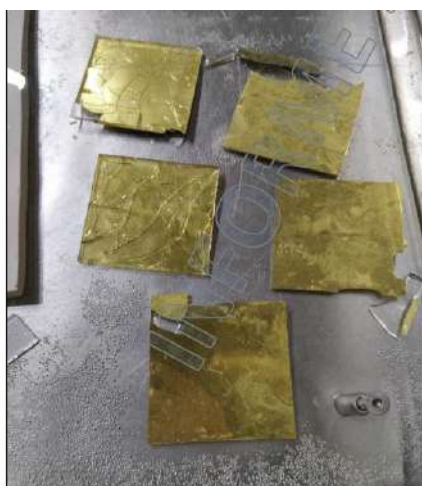


Figura 1.2 Muestras en el segundo ciclo



Figura 1.3 Muestras después del tercer ciclo

³⁶ Un vidrio convencional se rompe a una diferencia de choque térmico de 30°C mientras que, si está templado, su resistencia aumenta hasta los 200°C. Tomado de www.lavidriera.com

6.1.2.6. Ensayo para determinar la resistencia a la abrasión superficial. UNE-EN ISO 10545-7:21999

Etapa de abrasión efecto visible a revoluciones	clase
100	0
150	1
600	2
750, 1500	3
2100, 6000, 12000	4
> 12000	5

Ficha 1.15 Resistencia a revoluciones y clasificación

CLASE 2

Baldosa cerámica	Abrasion GL (mm ³)	Abrasión UGL (mm ³)
Azulejo	variable	/
Gres esmaltado	variable	/
Gres porcelánico	/	110-160 variable
Baldosín catalán	/	700-900
Gres rústico	/	240-400
Barro cocido	variable	300-800

Ficha 1.16 Abrasión de la superficie

El ensayo de resistencia a la abrasión superficial se evalúa mediante el método PEI (abrasión vía húmeda) el cual mide la resistencia al desgaste superficial de las baldosas y se clasifica en 5 grados como se observa en la ficha 1.15, en donde la clase 5 corresponde a la mayor resistencia.

La resistencia de los diferentes elementos depende del coeficiente de fricción, el cual depende de la interfase de los materiales que se contactan, y es la relación entre el esfuerzo y el peso a soportar por la superficie cuando es recorrida por un material manteniendo el contacto entre ambos; es decir: $\mu = F_t / F_n$ que, de hecho, está constituido por dos componentes: uno de adhesión y otro de deformación. (RINCÓN, 2005)

La clase 2, obtenida en los resultados de las muestras sometidas al ensayo de abrasión, muestra una resistencia hasta las 600 revoluciones en donde, a partir de este número, se empiezan a detectar defectos en la superficie del vidrio. La clase 2 es aceptada para pavimentos de tránsito peatonal bajo y calzado blando o normal, en los que pueda aportarse ocasionalmente pequeñas cantidades de material abrasivo (por ejemplo, salas de estar y comedores de viviendas u otras estancias con baja frecuencia de uso); se consideran baldosas inadecuadas para soportar calzado agresivo como las botas con clavos. (INSTITUT DE PROMOCIÓ CERÀMICA)

Con la ayuda de instrumentos como el rugosímetro 3D, es posible obtener datos numéricos que aporten el valor de corrosión/abrasión como se observa en la ficha 1.16³⁷ y en la figura 1.4.

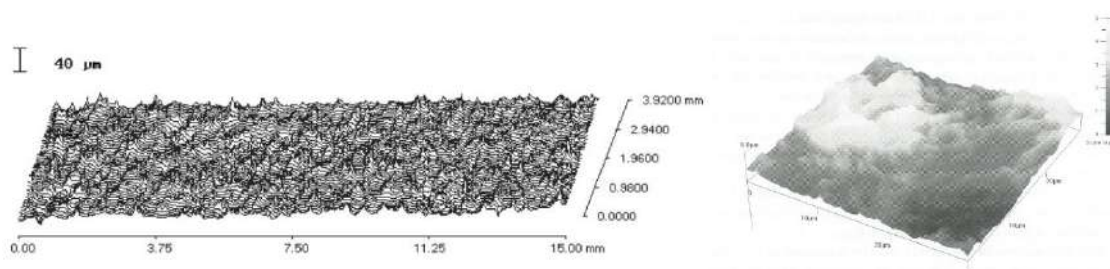


Figura 1.4 Perfil de una superficie de una baldosa abrasionada realizado con un rugosímetro (izquierda) y de una superficie con corrosión de un vidrio

³⁷ GL del inglés glazed (baldosas esmaltadas), UGL del inglés unglazed (baldosas no esmaltadas)

6.1.2.7. Ensayo para determinar la resistencia al rayado según Mohs. UNE 67101:1985 y 67101/1M:1992

Dureza	Mineral	Comentario	Composición química
1	Talco	Se puede rayar fácilmente con la uña	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
2	Yeso	Se puede rayar con la uña con más dificultad	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
3	Calcita	Se puede rayar con una moneda de cobre	CaCO_3
4	Fluorita	Se puede rayar con un cuchillo de acero	CaF_2
5	Apatito	Se puede rayar difícilmente con un cuchillo	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{Cl}, \text{F})$
6	Ortoclasa	Se puede rayar con una lija para el acero	KAlSi_3O_8
7	Cuarzo	Raya el vidrio	SiO_2
8	Topacio	Rayado por herramientas de carburo de wolframio	$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH}, \text{F})_2$
9	Corindón	Rayado por herramientas de carburo de Silicio	Al_2O_3
10	Diamante	El mineral más duro conocido, rayado solo por otro diamante.	C

Ficha 1.17 Escala de Mohs

Muestra	Dureza
1	4 (fluorita)
2	4 (fluorita)
3	4 (fluorita)

Ficha 1.18 Resultados ensayo resistencia al rayado

El ensayo para determinar la resistencia al rayado de la superficie del vidrio de mayor espesor se realiza mediante el método Mohs³⁸. Es un método cualitativo muy simple en donde, a partir de una clasificación por dureza de algunos materiales, se realiza una frotación contra el material a analizar. Cada material raya a los materiales que están por debajo de él en dureza. Teóricamente, si dos materiales con la misma dureza se frota, no debería existir ningún tipo de rayón.

Si se observa la ficha 1.17, el cuarzo (7) es un material que raya al vidrio. Siguiendo este orden, el vidrio debería estar entre la dureza 6 y 7. Si se mira la ficha 1.18, los resultados de laboratorio arrojan una dureza de tipo 4, un valor muy por debajo de la escala de clasificación. Las razones de este resultado pueden ser varias. Primero hay que saber que este método, aunque es muy simple, no es muy preciso, ya que los materiales poseen zonas o áreas que no tienen los mismos componentes por lo cual, el resultado puede variar. También, la rugosidad del vidrio y la superficie son muy importantes, por lo que no se debería generalizar un elemento, ya que al igual que en el caso anterior, los materiales pueden variar en su composición. Ya que el método de Mohs no es un método muy preciso, valdría la pena realizar otro tipo de ensayos como, por ejemplo, mediante un durómetro en donde se mide la resistencia al corte de la superficie a través del nivel de penetración y fuerza que se aplica sobre el material a analizar.

³⁸ Método ideado por Friedrich Mohs en 1822

6.1.2.8. Ensayo para determinar la resistencia a la dilatación térmica lineal. UNE-EN ISO 10545-8:2014

Sentido longitudinal	$7,4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Sentido transversal	$7,6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Ficha 1.19 Resultados ensayo resistencia a la dilatación térmica

Las muestras se exponen a un intervalo entre la temperatura ambiente y 100°C. Los resultados arrojados por el micrómetro después de realizar los ensayos concluyen con una variación de la dilatación del material respecto al origen, que no es significativa. Tanto en el sentido transversal como en el longitudinal, el elemento se comportó de manera muy parecida.

Para realizar este tipo de ensayo habría que tener en cuenta que un vidrio compuesto, al estar conformado por diferentes capas con materiales de diferentes características, la dilatación térmica teóricamente debería variar. Por lo cual, el resultado obtenido de los ensayos de APPLUS, dan muestra de que el análisis se realizó únicamente valorando la dilatación lineal del vidrio de mayor espesor³⁹.

6.1.2.9. Ensayo para determinar la resistencia a la helada. UNE-EN ISO 10545-12:1997

Muestra	Absorción inicial (%)	Absorción final (%)	Defectos visibles después de ensayo
1	0,00	0,00	No se observan defectos
2	0,00	0,00	No se observan defectos
3	0,00	0,01	No se observan defectos
4	0,00	0,00	No se observan defectos
5	0,00	0,00	No se observan defectos
6	0,00	0,01	No se observan defectos
7	0,01	0,01	No se observan defectos
8	0,00	0,00	No se observan defectos
9	0,00	0,00	No se observan defectos
10	0,00	0,00	No se observan defectos

Ficha 1.20 Resultados del ensayo para determinar la resistencia a la helada

Después de realizar 100 ciclos de hielo y deshielo con bajadas de temperatura a -5°C y posterior sumergimiento en agua a +5°C, en 10 muestras de vidrio metálico dorado, no se encuentran alteraciones mecánicas, por lo que el material resulta apto para estas condiciones.

³⁹ Coeficiente de dilatación térmica lineal de las baldosas cerámicas: $\alpha_1 = (4-8) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Tomado de: Institut de promoció ceràmica. Para ver coeficientes de dilatación de otros materiales, ir a los anexos en el documento: *Dilatación Térmica Lineal* del Institut de promoció ceràmica

6.1.3. Ensayos a realizar en espejos plateados. Norma UNE-EN 1036

Como ya se ha comentado a lo largo de este capítulo, las características de las *piastrelle* de vidrio dorado se asemejan más a las características que posee un espejo. Por tanto, previo a la existencia de una norma para poder realizar los ensayos y generar análisis cualitativos para el vidrio dorado específicamente, se aconseja la implementación de la norma UNE-EN 1036 relativa a los espejos plateados.

Esta norma plantea únicamente cinco tipos de ensayo de diferente índole:

a. Para determinar la durabilidad

- NSS: Ensayo a niebla salina neutra según la Norma Europea EN ISO 9227, la cual no se aplica a espejos exentos de cobre
- CASS: Ensayo acelerado a niebla salina cupro-acética según la Norma Europea EN ISO 9227
- Ensayo de condensación de agua en atmósfera constante. DIN 50 017 – Ensayos climático de condensación de agua

b. Para determinar el brillo

- Medición de reflectancia luminosa según la Norma EN 1036-1: 2008

c. Para determinar la adherencia

- Ensayo de adherencia del revestimiento de protección según la norma EN ISO 9227

6.2. Análisis desde el Laboratorio (experimentación – simulación)

Realizar un análisis desde el laboratorio significa someter elementos constructivos a procesos físicos y químicos intensivos de degradación por agentes externos en condiciones de laboratorio. Normalmente, se suelen utilizar cámaras climáticas de envejecimiento acelerado con el fin de anticipar fenómenos de envejecimiento que ayuden a entender el comportamiento del material respecto a los diferentes factores ambientales a los cuales está expuesto.

Es importante llevar a cabo este análisis, pues sumando este al estudio del producto proveniente de fábrica (4.1), es posible contrastar la aparición y la evolución de diferentes tipos de anomalías y aproximarse al momento en el cual se generan o se manifiestan y su posible desencadenante. En el capítulo 4.1 se analizaron las *piastrelle* individualmente, es decir, sin estar en contacto con ningún otro material y sin ser fraccionadas en las diferentes teselas para la composición del mosaico de *trencadís*. Por lo cual, se espera que en este nuevo proceso de análisis se obtengan conclusiones más cercanas a la realidad del producto en servicio. Resultados que será posible analizarlos y compararlos en el capítulo 4.3, donde se analiza el comportamiento real de los elementos en condiciones de envejecimiento naturales.

Existen dos formas mediante las cuales se pueden realizar experimentaciones obteniendo resultados diferentes. La primera opción se trata de la simulación del entorno ambiental de envejecimiento en el laboratorio. Este método es el más común, ya que, al tratarse de un proceso acelerado⁴⁰, se obtienen resultados más rápidamente sin tener que esperar durante un tiempo prolongado y, además, permite valorar el comportamiento del material en las reiteradas condiciones posibles. La segunda forma es mediante el uso de materiales que reemplazan a los originales expuestos a condiciones reales. Esta alternativa, aunque supone un tiempo de espera mayor, es una solución muy aconsejable, ya que se trata de un método no destructivo y, además, los resultados del comportamiento del material que se arrojan son reales, ya que se está actuando en un estado de servicio real.

La elección de alguna de las dos opciones de experimentación mencionadas depende tanto del tiempo que se dispone para realizar los ensayos como del coste. Se debe aclarar que por razones de maquinaria y de técnicos especializados, la primera opción (simulación del entorno) es más cara. Su especialización es mayor, pero los resultados anticipan posibles situaciones que se pueden prevenir.

El vidrio metálico dorado es un vidrio compuesto por tres elementos en donde los principales ataques ambientales los reciben las capas exteriores, es decir, los vidrios de protección. Los bordes perimetrales, también constituyen una zona desprotegida especialmente tras la rotura de las *piastrelle* para conformar las teselas de *trencadís*. La corrosión superficial es el deterioro que se debe tener más en cuenta cuando se habla de un vidrio, y la durabilidad depende de la respuesta de la superficie del material respecto a los ataques que dan lugar a esta anomalía. Es muy importante tener en cuenta esta situación, ya que la corrosión se trata de una pérdida irregular de las capas de la superficie del material que compone los vidrios y, por ende, se crea una debilitación de su estructura interna y se modifica el comportamiento mecánico del conjunto.

La corrosión del vidrio, cuando está expuesto a la intemperie, depende de varios factores ambientales como lo son la temperatura, la humedad del aire, la lluvia incidente, el viento, la

⁴⁰ También se pueden realizar experimentaciones no aceleradas mediante la exposición prolongada de muestras de referencia, pero lo normal es realizar procedimientos de envejecimiento acelerado

asolación y los posibles agentes contaminantes que transportan el agua y en aire. Frente a estos fenómenos hay dos puntos clave para poder determinar su durabilidad: por una parte, la composición del material vítreo y por otra, la permanencia (tiempo) o influencia de determinado factor ambiental sobre la superficie del vidrio.

6.2.1. Metodologías más comunes para la realización de experimentaciones:

a. Simulación del entorno

Dentro de esta primera opción, el experimento más simple para poder valorar la corrosión del vidrio es mediante la inmersión o el contacto de las muestras en soluciones acuosas⁴¹.

La corrosión superficial de un vidrio depende del valor del pH de las soluciones acuosas que se depositan sobre su superficie. Esto hay que tenerlo claro pues el viento y la lluvia, en condiciones reales, transportan partículas de diferentes materias que dependen del lugar y del entorno en donde se ubican. No es lo mismo estar expuesto a un ambiente marino que a uno de montaña

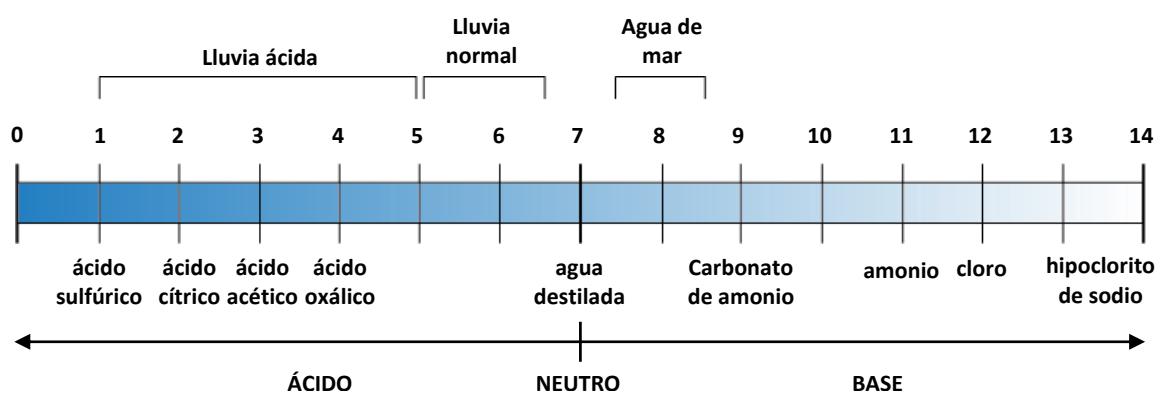


Figura 1.1 Escala de valores pH

Al no poseer detalles suficientes sobre la composición química de los actuales vidrios protectores del vidrio metálico dorado, se hará uso de la propuesta de composición de los tres tipos de vidrio más comunes aportada por el Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC)⁴² con el fin de poder exponer ejemplos de los diferentes resultados sobre los tipos de experimentación.

En la ficha 1.1, se observan los tres tipos de vidrio en donde dos de ellos (M 2.0 y M III) tienen como base el silicato (SiO_2) con un porcentaje apreciable de óxido de calcio (CaO) y en menor medida óxido de potasio (K_2O). El otro tipo de vidrio (M 153.1) está compuesto a base de óxido de potasio (K_2O), seguido por óxido de sodio (Na_2O) y óxido de fósforo (P_2O_5), contiene en menor medida de óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), óxido de aluminio o alúmina (Al_2O_3) y silicato (SiO_2).

Glass type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
M 153.1	1.0	1.9	17.8	5.0	3.2	18.0	53.1
M 2.0	61.2	/	/	23.4	/	/	15.4
M III	62.3	/	/	27.8	/	/	9.9

Ficha 1.1 Propuesta de composición de vidrios por el ISC

⁴¹ Este método se ha utilizado en el apartado 9.1.2 para realizar los ensayos sobre las *piestrelle* con la aplicación de la Norma UNE

⁴² Centro de promoción de la investigación especializado en materiales silicatos con sede en Wurtzbourg. <https://www.isc.fraunhofer.de>

Para poder realizar la primera experimentación y determinar la resistencia a la corrosión dependiendo del valor del pH, se aplican tres soluciones acuosas comunes con diferentes valores: ácido oxálico (normalmente usado para limpiar vidrios) pH4, agua pH7 y una solución alcalina como es el carbonato de amonio pH9, todos ellos aplicados con una duración continua de una semana. (Römich, 1999)

Los resultados de esta prueba se pueden observar en la figura 1.2, donde es apreciable que entre más se acerque la solución acuosa a las alcalinas (bases), el grado de corrosión aumenta, cambiando la estructura del elemento corroído en cada una de las situaciones. La solución acuosa ácida (ácido oxálico) presenta una corrosión menor y más regular respecto a las demás. Esto se debe a que sobre la superficie del vidrio se ha creado una capa de gel debido al ataque ácido y ha sido esta la que se ha agrietado. La solución acuosa alcalina (amonio) genera un grado de corrosión mayor que se manifiesta como un ataque en todos los puntos. Los resultados se manifiestan notablemente sobre el vidrio 1, ya que este, al contener un alto porcentaje de potasio⁴³, es el más sensible a la corrosión.



Figura 1.2 Ampliación de detalle de corrosión de la superficie de vidrios del mismo tipo (M 153.1) sometidos a soluciones con diferentes valores pH durante una semana.
De izquierda a derecha: sometimiento a ácido oxálico, vidrio sometido a agua y vidrio sometido a amonio

Otro experimento que simula el entorno del envejecimiento de la superficie del vidrio es la introducción de probetas de vidrio en cámaras de envejecimiento acelerado. Este método es mucho más especializado, ya que se requiere de máquinas y elementos especiales para la realización de los ensayos. Mediante este proceso, se introducen las probetas en una cámara climática en donde los diferentes ciclos de temperatura y humedad son programados para poder obtener las condiciones más intensas a las cuales el material puede enfrentarse. Normalmente, se estudian las condiciones de temperatura y humedad con un ambiente atmosférico con un alto contenido de SO₂, debido a que es el agente corrosivo de mayor importancia actualmente en entornos urbanos por efecto de la combustión de los combustibles fósiles.

“...In general, the accelerating effect is achieved by increasing temperature, humidity and/or the level of pollutants, which are indeed the most decisive parameters for glass corrosion.” (Römich, 1999, pág. 58)

El método concreto de envejecimiento acelerado en laboratorio y sus diferentes ensayos se explicará en apartados posteriores al momento de analizar los resultados de los diferentes ensayos a los cuales fueron sometidas las probetas de *trencadís*.

⁴³ El potasio (K) es un metal alcalino que se oxida rápidamente en el aire y es muy reactivo en el agua

b. Exposición de materiales al entorno

La exposición de materiales al entorno es la experimentación más fiel con la realidad (es la realidad), ya que consiste en colocar una serie de muestras (verticalmente como posición más común) al aire libre y dejar que los fenómenos ambientales actúen durante casi dos años (578 días) (Römich, 1999). Este tipo de experimentación, que es más lenta, tiene la ventaja de que se puede llevar un registro día a día, lo cual que permite ver el momento exacto de la aparición de la anomalía y el porcentaje de corrosión de la superficie del vidrio. En este proceso, ya que es mucho más lento, en los primeros meses de exposición parte de los compuestos creados se disuelven y son transportados por el agua lluvia creando una capa de gel que es en donde se desarrollan principalmente las anomalías. Otra de las ventajas es que se pueden crear diferentes muestras y ubicarlas en lugares con condiciones marcadamente distintas con el fin de comparar el comportamiento del elemento y mejorar la durabilidad del material.

Al realizar esta experimentación con las muestras de vidrio propuestas por el ISC, si se observan las imágenes obtenidas con el microscopio óptico en la figura 1.3, la diferencia entre las tres imágenes es abismal, pareciera que se trata de elementos muy diferentes y no es así. Lo primero que se puede observar es que existe una muestra que es marcadamente diversa a las otras dos. La muestra del centro (2) y la de la derecha (3), corresponden a elementos que se pusieron a la intemperie con el método de experimentación de exposición al entorno. Por el contrario, la imagen de la izquierda (1), ha sido sometida a ensayos mediante la simulación del entorno en laboratorio. Las muestras que han sido expuestas al entorno dejan ver unos patrones de corrosión del vidrio más regulares, en cambio, en la muestra sometida a la simulación del entorno, se generan un tipo de incrustaciones de cristal que se fueron acumulando puntualmente en algunas zonas de la superficie.

Si se profundiza un poco más en la observación comparada, es posible identificar que las imágenes 2 y 3 de la figura 1.3, aunque se trata del mismo tipo de vidrio, poseen patrones de deterioro diferentes y esto se debe a que la exposición de cada uno de ellos se ha realizado en lugares con entornos diferentes. La muestra de la imagen con formas más regulares se ubicó en Wank, una montaña al sur de Alemania con una altitud promedio de 700 metros (1780m cumbre). Si se observan las figuras 1.4 y 1.5, es posible entender que la regularidad de las grietas se debe primero, a la variación de temperatura, segundo, a los días de nieve y, por último, a la lluvia.

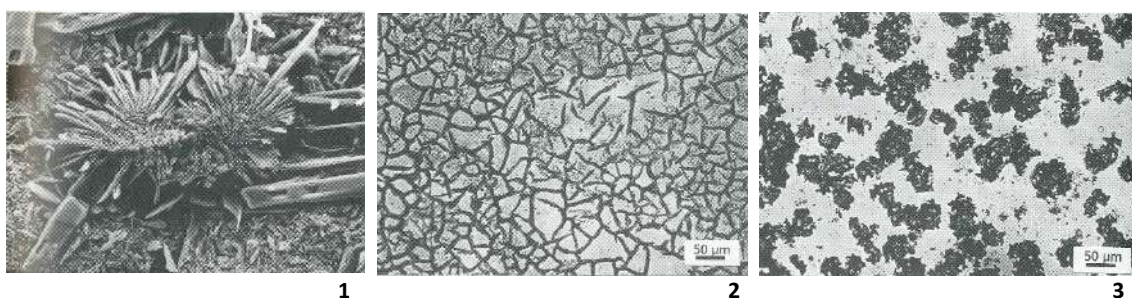


Figura 1.3 Ampliación de detalle de corrosión de vidrios del mismo tipo sometidos a diferentes experimentaciones.

De izquierda a derecha: vidrio bajo simulación del entorno y las dos imágenes restantes corresponden a vidrios expuestos al entorno; el primero en los Alpes (Wank) y el segundo en Würzburg

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Día máx °C	4	7	10	15	18	21	25	23	20	15	10	6
Precipitaciones	97 mm	52 mm	69 mm	60 mm	109 mm	116 mm	93 mm	100 mm	62 mm	68 mm	49 mm	89 mm
Días de nieve	17	16	11	4	0	0	0	0	0	2	8	14

Figura 1.4 Condiciones climáticas anuales de Wank

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Día máx °C	6	9	13	18	21	23	26	27	22	16	10	7
Precipitaciones	37 mm	21 mm	33 mm	21 mm	43 mm	34 mm	41 mm	32 mm	28 mm	24 mm	27 mm	47 mm
Días de nieve	10	7	3	1	0	0	0	0	0	0	3	8

Figura 1.5 Condiciones climáticas anuales de Würzburg

6.2.2. Patrones de deterioro obtenidos de los ensayos de laboratorio

6.2.2.1. Proceso de montaje y metodología para la valoración de las probetas sometidas a ensayos de laboratorio

La finalidad de este apartado es describir dos etapas del proceso de análisis para poder llegar a la catalogación de las anomalías de los elementos constructivos sometidos a diversos ensayos de laboratorio. En un primer instante, se describirá el montaje y las tipologías de las diferentes probetas de *trencadís* que fueron fabricadas para cada ensayo. Posterior a esto se pasará a exponer la metodología llevada a cabo para realizar el análisis después de obtener los resultados de los ensayos realizados a las probetas.

Además de realizar las probetas de *trencadís* con el vidrio metálico dorado de la empresa ORSONI⁴⁴, se han realizado pruebas con vidrio dorado de la empresa local de Jordi Vidal llamada VIDALGLASS⁴⁵.

Cabe aclarar que la empresa veneciana lleva varios siglos operando y especializándose en el producto del vidrio metálico dorado mientras que la empresa local lleva poca trayectoria en este ámbito. Se plantea esta opción para, por un lado, poder comparar los resultados de durabilidad de ambos vidrios y, por otro, para plantearse la posibilidad de trabajar con un proveedor local con el fin de poder reducir costes.

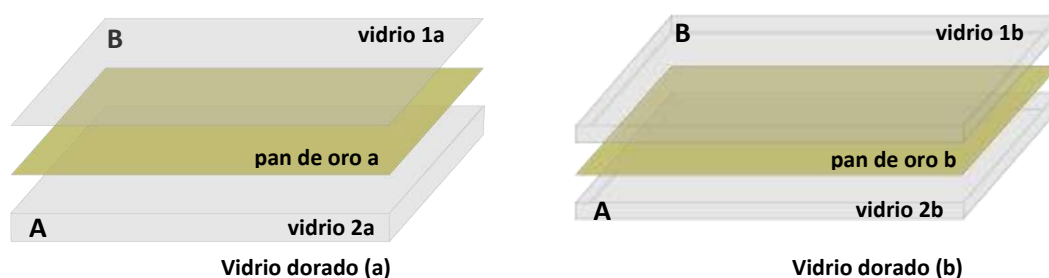


Figura 1.1 Composición de las *piastrelle* de vidrio dorado para los ensayos de laboratorio
(a) Vidrio dorado de ORSONI, (b) Vidrio dorado de VIDALGLASS

Como se puede observar en la figura 1.1, la composición de los dos vidrios dorados, que serán sometidos a ensayos de laboratorio es distinta. Las características del vidrio de ORSONI ya se han descrito, pero ahora es necesario identificar las características principales de VIDALGLASS.

VIDALGLASS se trata de un vidrio compuesto, conformado por tres capas: dos vidrios de protección del mismo espesor, cada uno de 3mm aproximadamente, más una lámina de pan de oro, la cual, según las muestras analizadas, parece estar compuesta también por dos capas. Al igual que el vidrio de ORSONI, se obtiene un espesor total de 6mm aproximadamente. Las láminas de pan de oro presentan una apariencia más lisa que la de ORSONI por lo que podría tratarse de un método de fabricación diferente respecto a las láminas que se usan en el vidrio dorado de ORSONI. En la figura 1.2, se puede apreciar la rugosidad y el brillo de los dos tipos de vidrio. Se desconoce la composición química de los vidrios de protección utilizados por VIDALGLASS.

⁴⁴ Ya se han descrito las características en el capítulo precedente

⁴⁵ <http://acav.cat/vidalglass/>

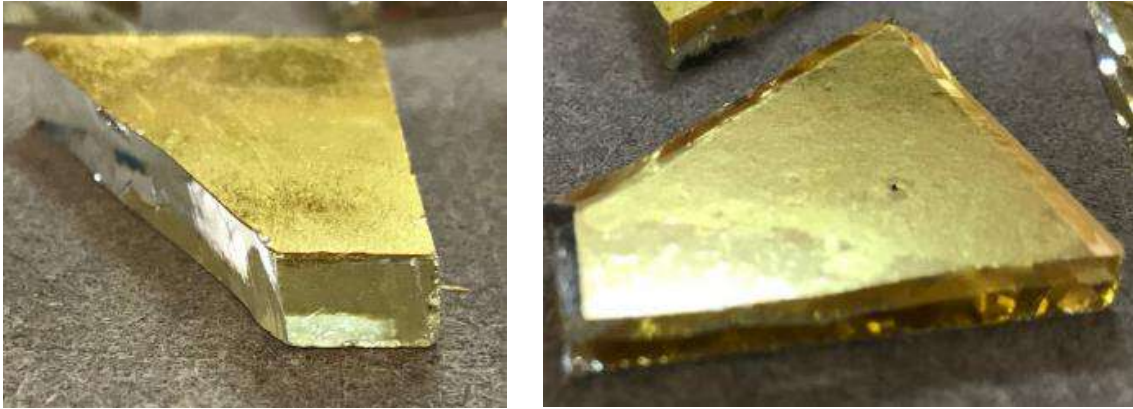


Figura 1.2 Secciones de trozos de vidrio dorado para la confección de las probetas de *trencadís*
Izquierda: Vidrio dorado de ORSONI, Derecha: Vidrio dorado de VIDALGLASS

Ventajas y desventajas de los dos tipos de vidrio:

- a. ORSONI: El vidrio metálico dorado de ORSONI al ser un vidrio compuesto por dos vidrios de protección de diferentes espesores actúa diferente en las dos caras. Por lo cual, cada vidrio tiene una función y una especialidad específica. Es un vidrio que resulta del proceso de muchos siglos de producción. Su fama, experiencia y prestigio, son los puntos fuertes de la empresa.

Uno de sus vidrios de protección, al aportar el espesor mayor de todo el vidrio dorado, posee mucho volumen del total de las *piastrelle*, lo que quiere decir que, al perder esta capa, el vidrio metálico dorado estaría casi perdido completamente.

La manipulación de las hojas de pan de oro es muy cuidadosa, ya que presenta muy poco porcentaje de defectos como rasgaduras, quiebres, entre otros. La lámina de pan de oro presenta rugosidad y mucha heterogeneidad en sus zonas lo que hace que el elemento sea rico en sombras y matices, debido a que la luz al incidir sobre ella, se refleja de manera diferente en cada punto.

La rugosidad variable de este elemento puede ser también una desventaja, ya que, en el momento de la unión, en caliente, de las diferentes capas del vidrio metálico dorado, puede haber zonas que no estén haciendo contacto completamente.

- b. VIDALGLASS: La mayor virtud del vidrio metálico dorado de VIDALGLASS es que al poseer dos vidrios de protección del mismo espesor, la selección de la cara de colocación de este es indiferente. También, gracias a esta simetría, en caso de pérdida de alguno de sus elementos, el vidrio dorado no se pierde al 100%.

Una de las desventajas principales es el menor cuidado en la manipulación y confección de las láminas de pan de oro, ya que generalmente presentan más rasgaduras en la superficie, además de algunas zonas dobladas. Las hojas de pan de oro, al ser de un material más liso, pierden parte de la riqueza de brillo y sombra que crean las rugosidades sobre la superficie, y también generan un material menos retroiluminado, es decir, más opaco.

6.2.2.1.1. Montaje de las probetas de *trencadís* con vidrio metálico dorado

Existen diferentes formas de colocación de las piezas de *trencadís* para poder conformar las probetas, pero se resume en dos métodos. El primero es el método directo (tradicional) en el cual se prepara la base con mortero de arena y cal y, sobre esta, cuando aún está fresco, se disponen las piezas de *trencadís* por presión hasta que el mortero rebosa y se coloca formando el rejuntado de bordes creando las diferentes composiciones geométricas. El segundo método, denominado prefabricado, consiste en la disposición de las piezas de *trencadís* creando la composición deseada sobre un molde y, sobre ellas, se vierte el mortero líquido que constituye al mismo tiempo soporte, fijación y rejuntado. Este método resulta idóneo para la prefabricación de formas complejas en taller.

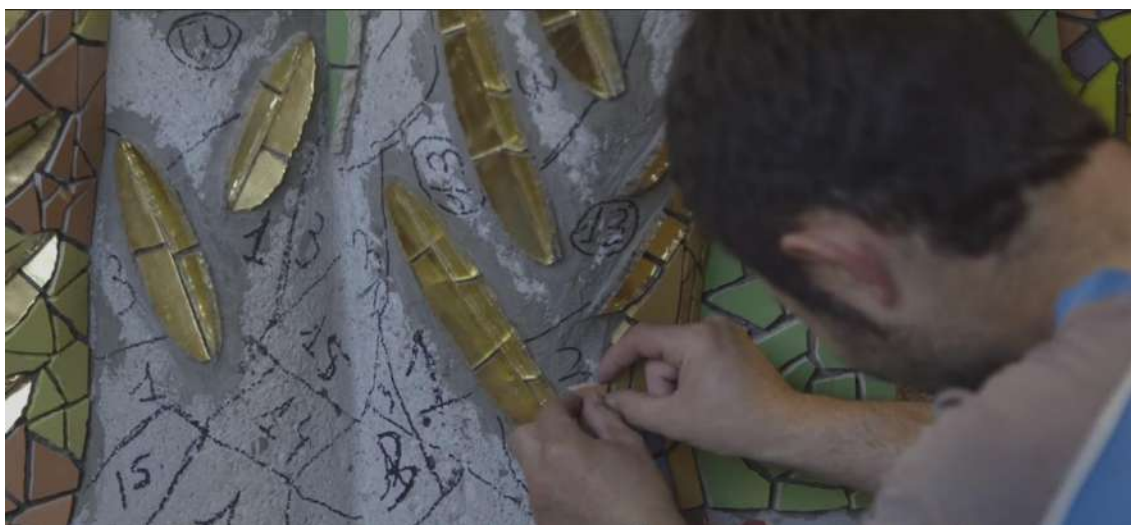


Figura 1.3 Fabricación de superficies de *trencadís*, con vidrio metálico y cerámica en taller con la técnica directa (actual, no tradicional)



Figura 1.4 Fabricación de superficies de *trencadís* con pórfido, gres, Sénia, entre otros, en taller con la técnica de prefabricado

Actualmente, en los procesos realizados a pie de obra para la substitución de revestimientos de *trencadís* deteriorados, el proceso empleado es el positivo, pero ejecutado en dos etapas: en la primera, se fijan las teselas una por una con mortero de fijación. En la segunda, se rejunta con el mortero de rejuntado, es decir, se utilizan dos tipos de mortero como mínimo.



Figura 1.5 Fabricación de superficies de *trencadís* a pie de obra con la técnica directa (actual, no tradicional)

Con el método tradicional directo, el proceso puede traer una serie de ventajas y desventajas respecto al método prefabricado. Dentro de las ventajas, la fase de retirada de restos de la superficie y la limpieza se pueden evitar o reducir, ya que el material no es cubierto completamente por mortero. También se ahorra en material, pues con el mismo mortero se realizan dos fases (base y rejuntado). Utilizar un solo tipo de mortero también evita el riesgo de incompatibilidades entre morteros de base y morteros de rejuntado. Como desventaja, las teselas de *trencadís* pueden quedar muy desniveladas una respecto a la otra y sería muy difícil retirarlas para reposicionarlas. Aunque mediante las formas de montaje directo o prefabricado, las teselas de *trencadís* de vidrio metálico dorado pueden colocarse en los métodos de anterior⁴⁶ o posterior⁴⁷, las probetas que se emplearán para los ensayos de laboratorio se realizarán solamente mediante el método de colocación posterior, ya que es de la única manera que se ha estado colocando las teselas de vidrio metálico dorado desde los años 2011-2012⁴⁸ hasta nuestros días. De esta manera, será posible comparar las probetas expuestas a ensayos de laboratorio fabricadas en método negativo con los resultados de los análisis de las piezas de *trencadís* utilizadas en el pináculo de San Bernabé mediante el método positivo y expuestas a más de 100 años a la intemperie.

En la figura 1.6 se puede observar la opción adoptada para la elaboración de las probetas de *trencadís*, en donde se lleva a cabo el siguiente proceso:

1. Corte de las *piastrelle* para obtener las teselas de *trencadís*.
2. Las teselas de *trencadís*, al hacer parte de un proceso manual, son cortadas con cizallas. Esto genera imperfecciones en el perímetro y la superficie por su corte, pero con la ventaja de que de esta forma se adhieren físicamente mejor al mortero lateralmente.
3. Preparación de la base de hormigón sobre la cual se va a componer el diseño *trencadís*.
4. Preparación del mortero de base.

⁴⁶ Cuando el vidrio de menor espesor queda expuesto

⁴⁷ Cuando el vidrio de mayor espesor queda expuesto

⁴⁸ Información suministrada por la Dra. Gómez Ramìo

5. Se presentan en seco las piezas de *trencadís* para lograr la mejor disposición.
6. Cuando se aprueba la disposición de la tesela de *trencadís*, se aplica mortero de fijación por doble encolado sobre la base, seguido de la aplicación de mortero sobre la cara oculta de la tesela de *trencadís*.
7. Se coloca la pieza de *trencadís* sobre la base de mortero fresco y se realiza una nivelación para que quede alineada con las demás teselas de su entorno.
8. Se repite el proceso hasta completar todo el diseño previsto y completar el área de la probeta.
9. Se prepara el mortero de rejuntado y se aplica sobre toda la superficie, rellenando las juntas y también los bordes.
10. Se realiza el retirado del mortero sobrante y, finalmente se limpia toda la superficie con agua y otros objetos de frotación.

El proceso que se muestra en la figura 1.6 ha sido realizado con piezas de cerámica, ya que no se tiene registro fotográfico alguno del proceso de montaje de las probetas realizadas con vidrio metálico dorado. Las probetas fueron preparadas por una empresa especializada, siguiendo las instrucciones dadas.



1. Corte de las *piastrelle*



2. Tesela de *trencadís*



3. Preparación de la base



4. Preparación mortero de



5. Prueba de composición



6. Aplicación mortero de base



6. Aplicación mortero a la tesela



7. Nivelado de las piezas



8. Repetición del proceso



8. Terminación colocación piezas



9. Preparación mortero de juntas



9. Aplicación mortero de juntas



9. Aplicación mortero en bordes



10. Retirada de material sobrante



10. Limpieza y probeta final

Figura 1.6 Proceso de fabricación de probeta de *trencadís* con cerámica

Tipos de probetas empleadas para los ensayos de laboratorio

Para los ensayos de laboratorio se prepararon 24 probetas ortoédricas con un tiempo de curación de 28 días y de dimensiones: 20cm x 20cm x 5cm, con 4 soluciones constructivas cada una, 2 en cada cara. Se fabricaron también 2 probetas testimonio, que no sufrirán ningún ensayo para poder así compararlas con los resultados.

Las 24 probetas se dividen en 3 grupos (de acuerdo a su configuración constructiva). Cada grupo de 8 probetas se subdivide en 4 subgrupos de 2 probetas según el ensayo de laboratorio a aplicar. Los 4 ensayos de laboratorio a aplicar (Coque térmico, Seco-Mojado, Hielo-Deshielo y Cristalización de Sales) surgen de los análisis desarrollados por la Dra. Gómez Ramió en su tesis doctoral denominada: *Los pináculos de la Sagrada Familia: Restauración y obra nueva*.

El Grupo 1 de probetas proviene de otros ensayos previos realizados en el 2015⁴⁹, por lo que no existe una probeta testimonio, sin alteraciones, y en vez de usar vidrio de VIDALGLASS, se ha utilizado como alternativa de comparación otro vidrio metálico dorado denominado Ariplak, producido por la firma Ariño.

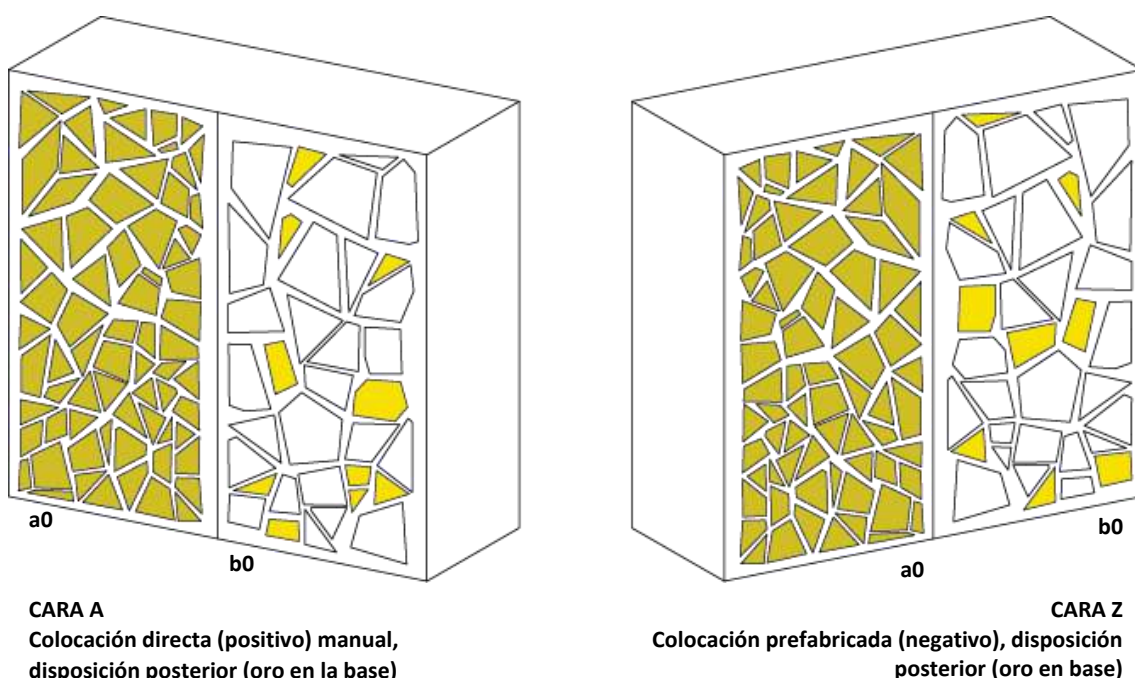


Figura 1.7 Probeta tipo Grupo 1

El Grupo 1 está compuesto por 8 probetas, de las cuales 2 serán sometidas a choque térmico (XT), 2 a mojado-seco (MS), 2 a hielo-deshielo (GD) y 2 a cristalización de sales (CS). La cara A de este grupo se ha fabricado mediante el método de montaje positivo con proceso de fabricación manual. La Cara Z se ha realizado mediante el método negativo, es decir, de manera prefabricada. Ambas caras están divididas, a su vez, en dos zonas (cada zona con 0.64 m²) en donde en las zonas a0 se han utilizado teselas de *trencadís* de vidrio metálico dorado de ORSONI y en las zonas b0 piezas grandes de trencadís de cerámica y algunas de menor tamaño de vidrio metálico dorado de Ariplak.

El Grupo 2 también está compuesto por 8 probetas de las cuales 2 serán sometidas a choque térmico (XT), 2 a mojado-seco (MS), 2 a hielo-deshielo (GD) y 2 a cristalización de sales (CS). La

⁴⁹ A las probetas del Grupo 1 se les ha realizado 40 ciclos de cada ensayo (XT, MS, GD, CS) en el 2015

cara A de este grupo se ha fabricado mediante el método de montaje positivo con proceso de fabricación manual. La Cara Z mediante el método negativo. Ambas caras están divididas en dos zonas (cada zona con 0.64 m^2), donde en las zonas a0 se han utilizado teselas de *trencadís* de vidrio metálico dorado de ORSONI y en las zonas b0, piezas de *trencadís* de vidrio metálico dorado de VIDALGLASS.

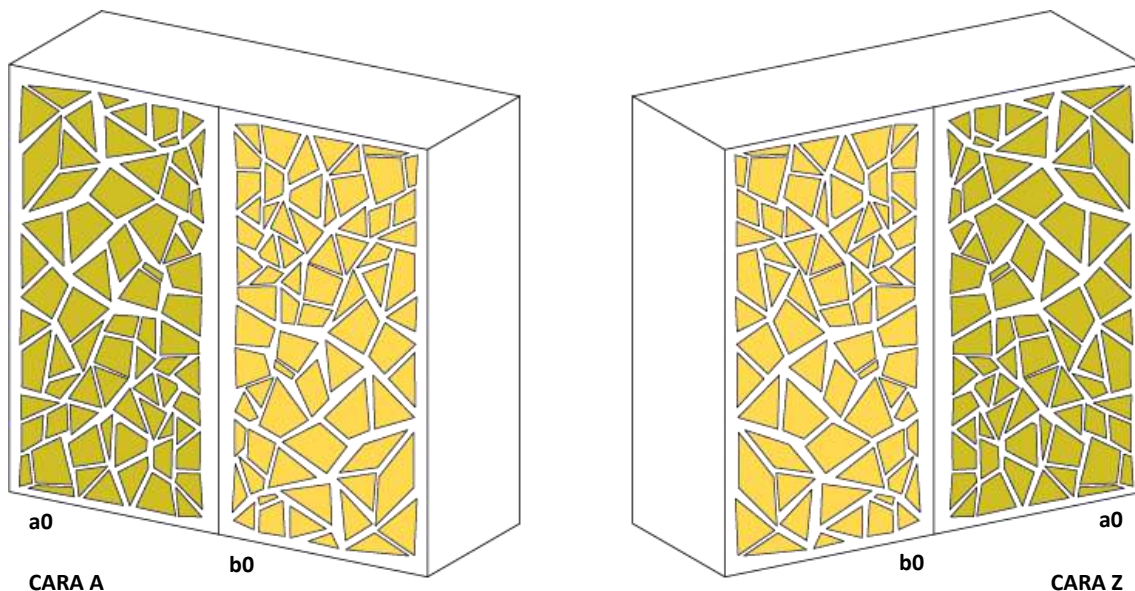


Figura 1.8 Probeta tipo Grupo 2

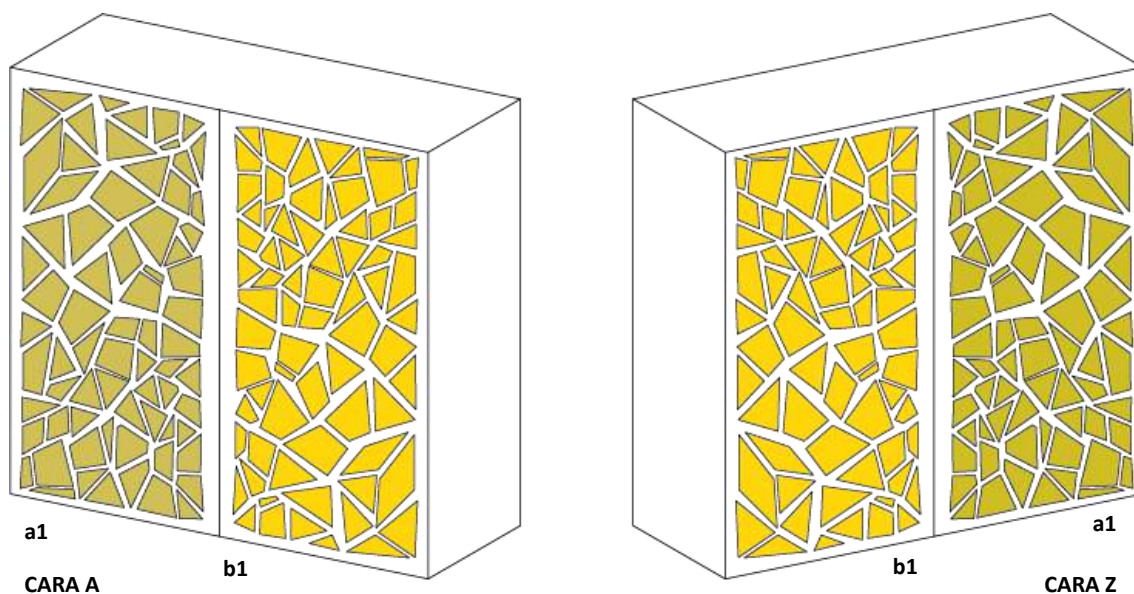


Figura 1.9 Probeta tipo Grupo 4

El Grupo 4 está compuesto de igual manera por 8 probetas de las cuales 2 serán sometidas a choque térmico (XT), 2 a mojado-seco (MS), 2 a hielo-deshielo (GD) y 2 a cristalización de sales (CS). La cara A de este grupo se ha fabricado mediante el método de montaje positivo con proceso de fabricación manual. La Cara Z mediante el método negativo de manera prefabricada. Ambas caras están divididas en dos zonas (cada zona con 0.64 m^2), donde en las zonas a1 se han utilizado piezas de *trencadís* de vidrio dorado de ORSONI y en las zonas b1, piezas de *trencadís* de vidrio dorado de VIDALGLASS selladas con el protector para vidrios EUROSIELD⁵⁰.

⁵⁰ Protector recomendado por personas especializadas. <https://www.enduroshield.com>

6.2.2.1.2. Metodología para la valoración



Figura 1.10 probetas sometidas a ensayos

Para realizar la valoración de los ensayos de las probetas de *trencadís* de vidrio metálico dorado, se han utilizado diferentes técnicas con el fin de obtener los mejores resultados. El primer paso para poder realizar la metodología de análisis correctamente fue enumerar y nombrar las probetas de acuerdo a las figuras 1.7, 1.8 y 1.9 para cada grupo respectivamente⁵¹. Después de identificarlas, el primer instrumento que se utilizó para realizar un levantamiento del estado actual de las probetas (antes de ser sometidas a los 80 ciclos en los ensayos de laboratorio) fue la cámara fotográfica. Se ha realizado un levantamiento fotográfico por cada cara de la probeta apoyada sobre una superficie plana.

Realizar el levantamiento fotográfico de una probeta apoyada sobre una superficie plana permite identificar algo tan simple como la diferencia que existe entre las superficies de las dos caras (manual/prefabricado). La cara A, que fue realizada mediante el método positivo o manual, no tiene un acabado tan enrasado. Por medio de la comparación de las sombras que se generan en la propia fotografía es posible identificar esta diferencia. Por el contrario, la cara Z toca la base de la mesa completamente y no produce sombra mientras que la cara A si la produce. Obviamente realizando un análisis visual o de tacto de la superficie, esto resulta aún más evidente.

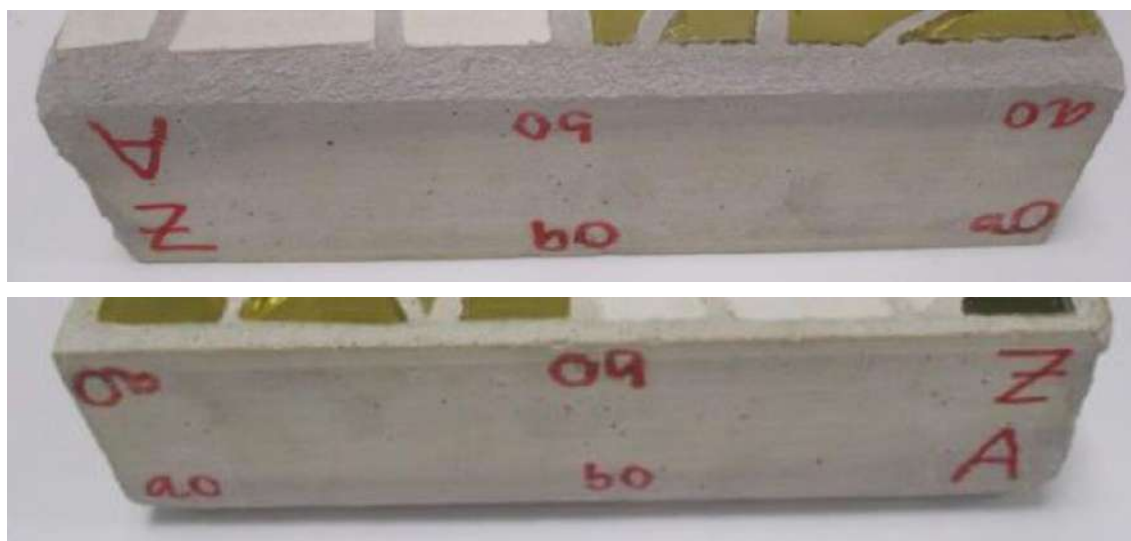


Figura 1.11 caras A y Z de la probeta apoyadas sobre superficie plana

⁵¹ Las probetas del Grupo 1 ya estaban enumeradas de los ensayos que se realizaron previamente y se continuó con la misma manera de nombrar para evitar confusiones

A. Metodología previa a los ensayos de laboratorio

Fotografía digital de las probetas: Antes de la realización de los ensayos de laboratorio, se ha realizado un levantamiento fotográfico mediante el uso de la cámara fotográfica de referencia CANON EOS 1300D siguiendo el proceso que se describe a continuación:

- División de las probetas en dos grupos: Grupo 1 (probetas que ya han sufrido 40 ciclo en el año 2015); Grupo 2 (incluidas las probetas del Grupo 4) (probetas sin ningún tipo de alteración).
- Limpieza cuidadosa de las teselas de *trencadís* de las 24 probetas mediante una solución líquida común para limpieza de cristales.
- Disposición de las 24 probetas, por numeración, sobre una superficie plana (de color blanco) con la cara A (positivo-manual) expuesta⁵².
- Fotografía de cada probeta realizada mediante el giro de la cámara a 45 grados con el objetivo de evitar el reflejo de objetos no deseados sobre las teselas de vidrio metálico dorado del *trencadís* y para evidenciar la numeración lateral de las caras.
- Repetición de los dos pasos anteriores por la cara Z (negativo-prefabricado) expuesta.
- Descarga de imágenes de la cámara fotográfica al ordenador para su posterior edición.

Edición de las imágenes digitales: Las imágenes se han guardado como archivos de formato .jpg. Los perfiles de las imágenes de las probetas se han recortado usando el software de edición Adobe Photoshop CS6 con el objetivo de evitar posibles efectos del fondo sobre la visión de las probetas.

Montaje de fichas: Después de obtener las imágenes editadas, se hace la unión de imágenes por Grupo (1 o 2) y por número de probeta para poder obtener la secuencia de las dos caras. Se crean fichas de cuatro grupos de probeta con su nombre identificativo, respectivamente.

Valoración cuantitativa de las probetas antes de completar los 80 ciclos: Se realiza una valoración cuantitativa de 1 a 5 del estado inicial de las probetas, en donde 1 son las que se encuentran en peor estado y 5 las de mejor. La valoración se realiza en los dos ámbitos principales del vidrio dorado: apariencia (brillo) y mecánica (resistencia y adherencia). Dentro del primer ámbito, se valoran principalmente dos anomalías: restos de cemento y degradación del material dorado. Son dos componentes que influyen en el brillo del vidrio metálico dorado. En cuanto a la mecánica, se valoran también dos factores: adherencia y discontinuidades⁵³. Realizada la valoración de todos los factores, se saca una media numérica para cada ámbito. Obtenida la media de cada ámbito (aspecto y mecánica) se realiza una nueva valoración entre la media resultante de las dos probetas analizadas. Esta operación se realiza por cada cara y para cada zona individualmente.

El resultado cuantitativo de la valoración se lleva a los gráficos de evolución del comportamiento del vidrio metálico dorado en apartados posteriores.

⁵² El código de enumeración y de identificación de cada probeta, se puede observar en el documento “*Campanya d’assaigs de durabilitat del revestiment de trencadís METALL80+COLOR40*” del Dr. Arquitecto Zamora i Mestre

⁵³ Dentro del factor de discontinuidades entran: rayones, grietas, raspaduras, hendiduras, etc.

A.1. Resultados de la valoración de las probetas antes de completar los 80 ciclos de ensayos de laboratorio

Para la valoración de las probetas, se realizan 3 grupos que corresponden los tres tipos de probeta fabricadas (M1, M2 y M4).

a1. RESULTADOS – CARA A			
GRUPO / S.E.		ASPECTO	MECÁNICA.
M1	a	4	3
	b	3	3
M2	a	3	4
	b	4	4
M4	a	3	4
	b	4	4

a2. RESULTADOS – CARA Z			
GRUPO / S.E.		ASPECTO	MECÁNICA
M1	a	3	4
	b	3	4
M2	a	4	4
	b	3	4
M4	a	4	4
	b	4	4

b1. RESULTADOS – CARA A			
GRUPO / S.E.		ASPECTO	MECÁNICA
M1	a	2	3
	b	2	3
M2	a	3	4
	b	3	3
M4	a	3	4
	b	4	4

b2. RESULTADOS – CARA Z			
GRUPO / S.E.		ASPECTO	MECÁNICA
M1	a	3	4
	b	2	3
M2	a	3	4
	b	2	4
M4	a	3	4
	b	3	4

c1. RESULTADOS – CARA A			
GRUPO / S.E.		ASPECTO	MECÁNICA
M1	a	3	3
	b	2	3
M2	a	4	4
	b	4	4
M4	a	3	3
	b	4	4

c2. RESULTADOS – CARA Z			
GRUPO / S.E.		ASPECTO	MECÁNICA
M1	a	2	3
	b	2	3
M2	a	4	4
	b	4	4
M4	a	3	4
	b	4	4

d1. RESULTADOS – CARA A			
GRUPO / S.E.		ASPECTO	MECÁNICA
M1	a	3	3
	b	2	3
M2	a	3	4
	b	3	3
M4	a	3	4
	b	4	4

d2. RESULTADOS – CARA Z			
GRUPO / S.E.		ASPECTO	MECÁNICA
M1	a	2	2
	b	2	3
M2	a	3	4
	b	3	4
M4	a	3	4
	b	3	4

Ficha 1.1 Resumen de las valoraciones de las probetas previo a los 80 ciclos

Como puede observarse en la ficha 1.1⁵⁴, ninguna de las probetas inicia con una valoración de 5, ya que han sufrido algún percance, ya sea al momento de la fabricación, manipulación o transporte.

La valoración del Grupo M1, por lo general, es inferior a la de los otros dos grupos, ya que las probetas de este grupo han sufrido ensayos de envejecimiento acelerado previamente. Es decir, estas probetas no inician su valoración a partir del momento 0 sino del ciclo 40.

Las probetas de los grupos M2 y M4 tienen valoraciones muy similares.

⁵⁴ Para ver las valoraciones completas, ver las fichas VALORACIÓN INICIAL DE LAS PROJETAS (FVI) en los anexos

B. Metodología posterior a los ensayos de laboratorio

Posterior a la entrega de los resultados y de las probetas expuestas a los diferentes ensayos, se realiza un levantamiento fotográfico para obtener el registro de los resultados y para poder realizar una valoración más detallada de la situación.

A diferencia de la metodología utilizada previa al análisis de laboratorio, en este caso, se ha realizado el levantamiento mediante la aplicación del escáner plano, ya que después de hacer diferentes pruebas buscando la mejor manera de obtener imágenes cenitales de las probetas sin que el brillo y reflejo afectasen, esta ha sido considerada como la mejor alternativa. La probeta, al estar completamente en contacto con el vidrio del escáner plano, evita que otros elementos del entorno afecten en su brillo y su reflejo. Además, la distribución de la luz móvil proyectada por el escáner genera una mejor uniformidad en el brillo y reflejo de la imagen.

Digitalización: Las probetas han sido digitalizadas mediante el uso de un escáner plano de referencia EPSON GT-15000 siguiendo el proceso que se describe a continuación:

- Limpieza cuidadosa del cristal de apoyo del escáner plano.
- Disposición de las probetas en orden de numeración (sin ninguna alteración de limpieza) sobre el cristal en grupos de a dos. Primero por la cara A (positivo-método de colocación manual).
- Escaneado de las imágenes mediante el software incluido en la instalación propia de la máquina y con una resolución de 300 a 600 ppp.
- Retirada de las probetas.
- Se repiten de nuevo todos los pasos esta vez girando las probetas para que la cara Z (negativo-prefabricado) quede en contacto con el cristal del escáner.

Edición de las imágenes digitales: Las imágenes de las probetas han sido guardadas como archivos .jpg. Han sido manipuladas mediante el software Adobe Photoshop CS6 con el objetivo de separar cada probeta (ya que vienen en grupos de a dos) y de recortar su perfil. Es importante poder obtener la imagen de la probeta perfilada ya que en los diferentes ensayos de laboratorio los bordes del mortero sufrieron diferentes alteraciones que son importantes para el análisis.

Seguido a la individuación de cada imagen y a su perfilado, se juntan ambas caras (A y Z) de cada probeta para tener el conjunto.

Valoración cualitativa visual de las muestras: Se realiza una valoración visual de las 24 probetas de *trencadís* en donde se comparan con las imágenes originales con el fin de determinar los cambios y la aparición de anomalías mediante el sometimiento a ensayos de laboratorio.

Valoración cuantitativa de las probetas después de completar los 80 ciclos: Se realiza una valoración cuantitativa de 1 a 5 del estado final de las probetas, en donde 1 son aquellas que se encuentran en peor estado y 5 las de mejor. La valoración se realiza en los dos ámbitos principales del vidrio dorado: aspecto (brillo) y mecánica (resistencia y adherencia). Dentro del primer ámbito, se valoran dos parámetros: restos de cemento y degradación del material dorado. Son dos componentes que afectan a diferentes elementos del vidrio metálico dorado pero que influyen su color y su aspecto. En cuanto a la mecánica, se valoran también dos factores: adherencia y discontinuidades⁵⁵. Realizada la valoración de todos los factores, se saca una media numérica para cada ámbito. Obtenida la media de cada ámbito (aspecto y mecánica)

⁵⁵ Dentro del factor de discontinuidades entran: rayones, grietas, raspaduras, hendiduras, etc.

se realiza una nueva valoración entre la media resultante de las dos probetas analizadas. Esta operación se realiza por cada cara y cada zona individualmente.

El resultado cuantitativo de la valoración se lleva a los gráficos de evolución del comportamiento del vidrio dorado en apartados posteriores.

Gráficos de la evolución del comportamiento de las probetas de vidrio metálico dorado: Al obtener los valores cuantitativos tanto de la fase inicial como de la fase final del estado de las probetas, se realiza una serie de gráficos cartesianos para cada cara y cada zona. Además, si se tiene registro de los ciclos en los cuales se producen de cambios aportados por el laboratorio encargado de los ensayos, se trasladan al gráfico. Las curvas generadas en los gráficos son de tres tipos: lineal constante, logarítmica o lineal afín.

Recopilación de las anomalías generadas en los ensayos de laboratorio mediante el método de microscopio digital óptico: Como se describió en el capítulo 3 en el apartado 3.1, uno de los métodos ópticos de análisis, es la utilización del microscopio óptico. Esta herramienta ayuda a determinar con más exactitud la morfología de la anomalía y la ubicación de ésta en las diferentes capas del vidrio metálico dorado.

6.2.2.2. Ensayos de envejecimiento acelerado en laboratorio

Someter las probetas a ensayos de envejecimiento acelerado nos permiten poder analizar el comportamiento de un material frente a diferentes condiciones a largo plazo. El conocimiento de los diferentes comportamientos permite mejorar la reacción de los materiales frente a diversos ambientes. Por otro lado, al tratarse de ensayos acelerados, el tiempo empleado es mucho menor respecto a otras técnicas como el análisis mediante la exposición a la intemperie que si bien, es de los más confiables frente a los fenómenos ambientales actuales, algunos factores como el cambio climático no aseguran que siempre vaya a ser así por lo cual es mejor preparar los elementos frente a las peores situaciones.

Como ya se ha visto en apartados anteriores, las teselas de *trencadís* de vidrio metálico dorado se han colocado en las probetas únicamente en la posición posterior (vidrio de menor espesor en la base) tanto en negativo (método prefabricado) como en positivo (método manual). Esto se debe principalmente a que la posición del vidrio ha permanecido invariable durante los últimos años (en vidrio de mayor espesor hacia el exterior para poder resistir mejor los ataques ambientales). Los métodos positivo y negativo son dos métodos que desde la época de la implementación del *trencadís* como revestimiento exterior, realizada por Gaudí, han sido trabajados debido a la complejidad de las formas y a las dimensiones de las superficies.

También se ha mencionado que, además de las diferentes técnicas de colocación de las teselas de *trencadís* de vidrio metálico dorado, las probetas han sido conformadas con vidrio metálico dorado de diferentes proveedores con el fin de contrastar y poder determinar la idoneidad y la durabilidad de cada material frente a los fenómenos externos.

Cabe la pena aclarar nuevamente, que de las 24 probetas que se han sometido a los 80 ciclos, 8 probetas (Grupo 1) en el 2015 ya han sido sometidas a 40 ciclos por lo cual en este caso se les realizaran solamente 40 ciclos para completar los 80 ciclos.

A continuación, se detallan algunos datos para los ensayos realizados:

Empresa de realización de los ensayos: APPLUS

Fecha de entrega material: 18/01/2018

Material entregado: Probetas ortoédricas de 20 cm x 20 cm x 5 cm

Ensayos realizados:

- Choque térmico (XT)
- Mojado – Secado (MS)
- Hielo – Deshielo (GD)
- Cristalización de sales (CS)

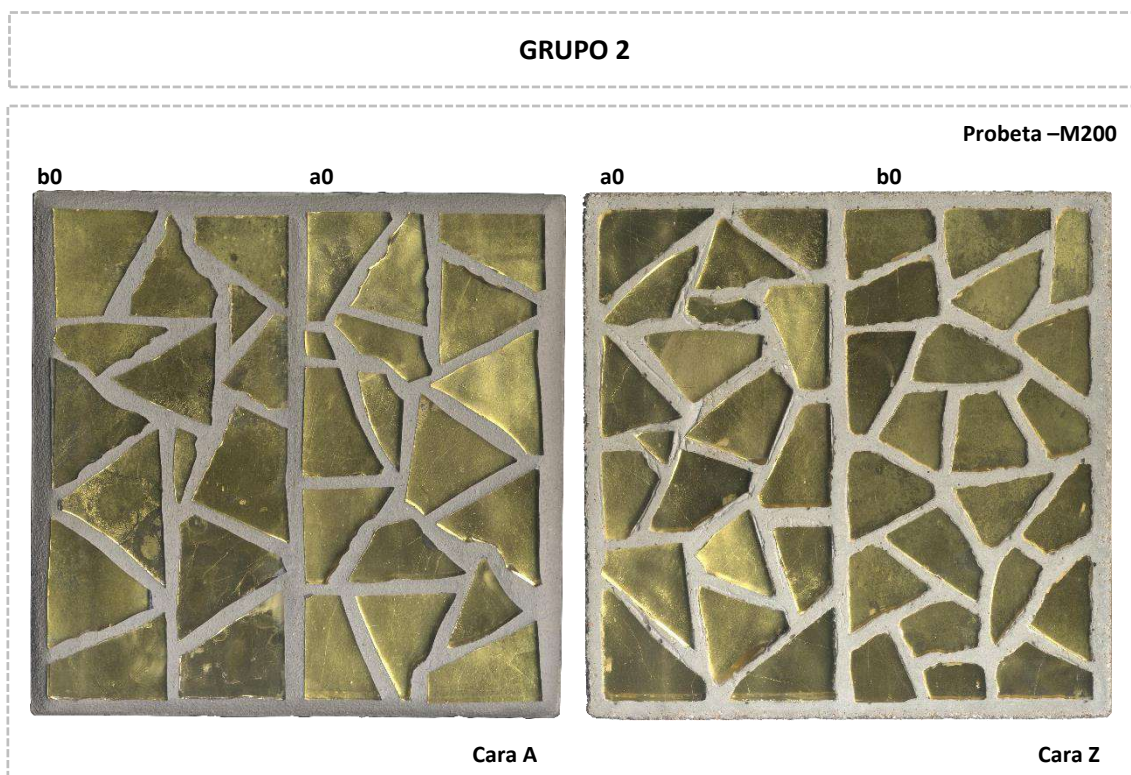
Fecha de iniciación de los ensayos: 26/02/2018

Fecha de entrega de los resultados: 18/09/2018

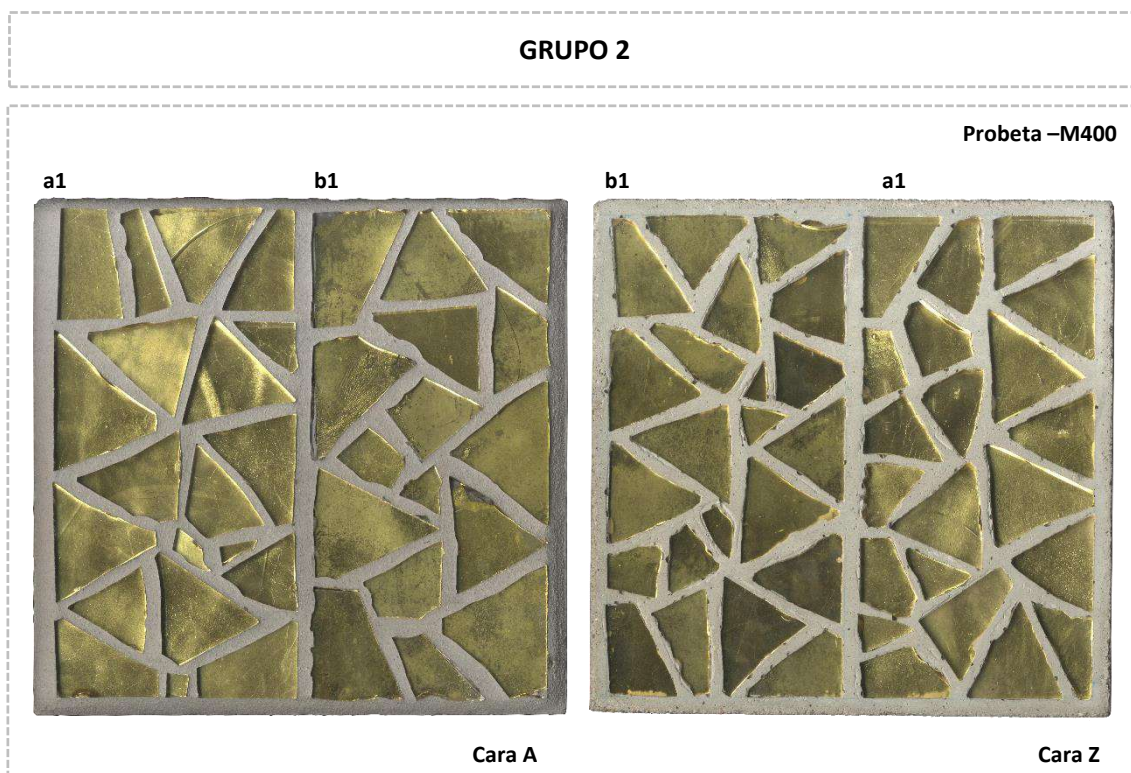
Forma de colocación de las piezas para las pruebas: positivo (manual) negativo (prefabricado)

Características de las muestras: las mismas que en el apartado 4.2.2.1.1

A. Probetas testimonio, sin exposición a ensayos



Ficha 1.1 Probeta de muestra sin ensayos



Ficha 1.2 Probeta de muestra sin ensayos

Para las probetas del Grupo 2 (M2 y M4), antes de realizar los diferentes ensayos de laboratorio, se han preparado dos probetas testimonio (con la misma composición de aquellas que serán expuestas a los ensayos de envejecimiento acelerado en laboratorio) las cuales no serán sometidas a ningún tipo de ensayo. De esta manera, por un lado, se puede tener un registro de una probeta sin ningún tipo de intervención en laboratorio y, además, es posible comparar los resultados de los ensayos de las probetas finales con estas. Como nota aclaratoria, el Grupo 1 de probetas, al ser realizado con mucho tiempo de anterioridad (año 2015), no posee esta probeta testimonio, sin alteraciones, por lo cual deberá ser comparada con las probetas sin alteraciones del Grupo 2 y con fotografías.

En las fichas 1.1 y 1.2 se pueden observar las probetas testimonio que no han sufrido ningún tipo de ensayo de laboratorio. Sin embargo, si analizamos detenidamente cada imagen, ya aparecen una serie de anomalías, que como ya se he mencionado en capítulos anteriores, responden a defectos de los propios procesos de fabricación del vidrio metálico dorado, manipulación y transporte. A estos procesos, en este caso, se deben sumar las anomalías provenientes del proceso de montaje de las probetas en donde las *piastrelle* de vidrio metálico dorado han sido cortadas en teselas y montadas. Varias de las anomalías que surgen en este proceso son la evolución de las anomalías primarias de los procesos anteriores, y otras, son anomalías de nuevo origen.

Vale la pena recordar que la composición de la Cara A de las probetas se ha realizado mediante el sistema de fijación y rejuntado manual, mientras que en la Cara Z se ha procedido con un sistema de fijación y rejuntado prefabricado. En las probetas del Grupo 2 (codificaciones M2 y M4), ambas caras poseen vidrio metálico dorado de dos tipos: ORSONI y VIDALGLASS. Además, las probetas del subgrupo M4, en la zona b1 de cada cara, han sido selladas con el protector ENDUROSHIELD para ver su eficacia. El objetivo de la aplicación de este sellador es el de comprobar si alguno de los ataques provenientes desde el exterior, ya sean sobre la superficie o sobre los bordes de las teselas de *trencadís*, se puede reducir o incluso frenar.

A continuación, se detallan algunas de las anomalías más frecuentes que se manifiestan tras el proceso de montaje de las probetas de *trencadís*. El análisis que se ha realizado es de tipo comparativo y objetivo, por lo cual, en ningún caso existe una preferencia de marca ni de empresa.

B. Anomalías en el montaje de las probetas de *trencadís*

B1. Grupo 2, subgrupo M2 – Observaciones iniciales

Al hacer una primera aproximación a los dos tipos de vidrio (ORSONI/VIDALGLASS) y a los dos sistemas empleados (manual-Cara A/prefabricado-Cara Z), lo primero que se puede observar es que la lámina dorada de VIDALGLASS es más uniforme y lisa mientras la de ORSONI es más heterogénea y rugosa. Debido a esta diferencia, vemos que las piezas de ORSONI, ya sean dispuestas de modo manual o prefabricado, brillan más debido a los contrastes que se crean entre luz y sombra. La lámina de pan de oro de VIDALGLASS es mucho menos brillante e incluso resulta ser muy opaca⁵⁶.

Las esquinas y los bordes de las teselas de *trencadís* son mucho más reflectantes en el vidrio de ORSONI que en el de VIDALGLASS, lo que lleva a pensar que la calidad de la lámina de pan de oro utilizada en la primera empresa es superior.

Ahora bien, si comparamos los dos sistemas de fijación (manual/positivo y prefabricado/negativo), observamos que en el método manual (figura 1.1), las teselas de *trencadís* de las dos empresas están niveladas. El mortero presenta una composición lisa, sin muchos detalles. En cambio, en el método prefabricado (figura 1.2), las teselas de vidrio metálico dorado de ORSONI sobresalen mucho más del plano del mortero, ya que, al estar dispuestas en posición posterior, los casi 6 mm del vidrio de mayor espesor están colocados hacia el exterior mientras que VIDALGLASS cuenta solo con un vidrio de 3mm. Esta diferencia de milímetros hace que el molde no quede nivelado para ambas zonas y, a la hora de retirar el molde, el mortero rebosa y se alberga en el espacio que queda entre el borde del vidrio y la base del mortero⁵⁷. La superficie de las teselas de *trencadís* presentan más rayones con el método de colocación prefabricado debido, seguramente, a la mayor dificultad a la hora de retirar la lechada de mortero que se adhiere al vidrio por efecto del fondo de molde.

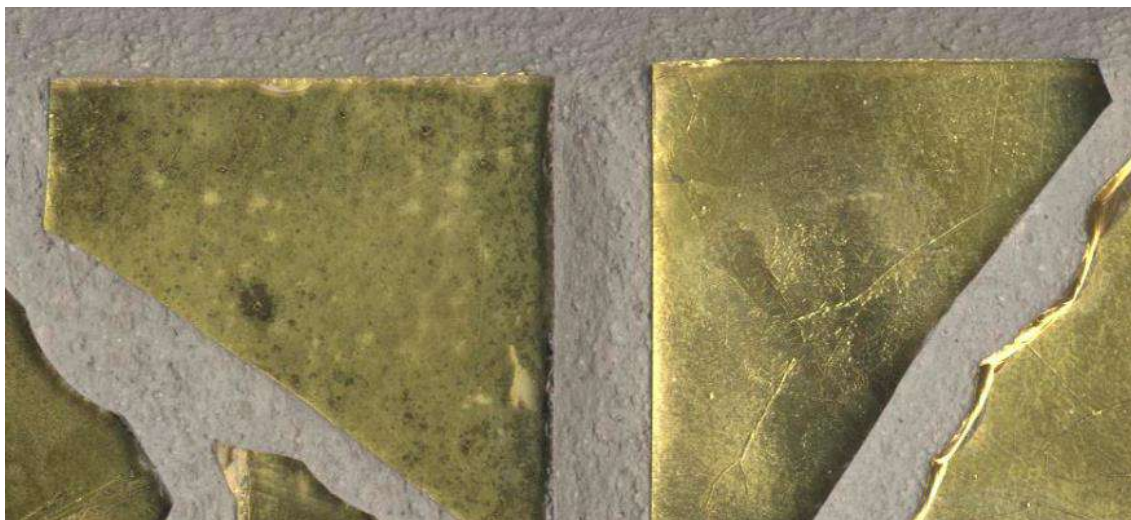


Figura 1.1 Cara A (método de colocación manual/positivo) probeta M200 - contraste entre los dos tipos de vidrio utilizado para las probetas de *trencadís*. Izquierda VIDALGLASS (b0), derecha ORSONI (a0)

Aunque las láminas de pan de oro de ORSONI están más retrocedidas respecto a las de VIDALGLASS, se observa que su brillo es mayor.

⁵⁶ Para apreciar la diferencia de los dos tipos de vidrio, ver la ficha 1.2 del apartado 4.2.1.1

⁵⁷ El vidrio de ORSONI colocado en la cara A, sobresale 3mm más respecto al vidrio de VIDALGLASS

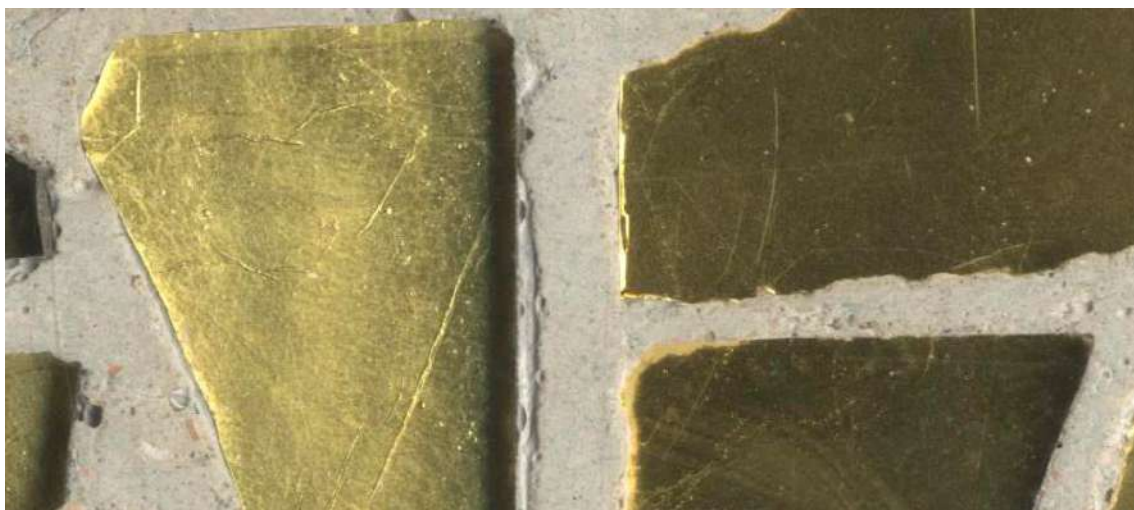


Figura 1.2 Cara Z (método de colocación prefabricado/negativo) probeta M200 - contraste entre los dos tipos de vidrio utilizado para las probetas de *trencadís*. Izquierda ORSONI (a0), derecha VIDALGLASS (b0)

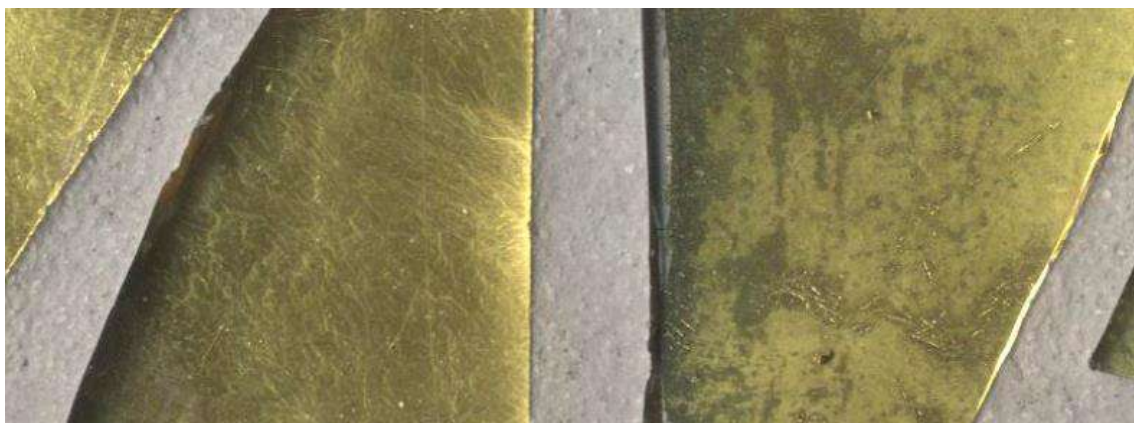


Figura 1.3 Cara A (método de colocación manual/positivo) probeta M400 - contraste entre los dos tipos de vidrio utilizado para las probetas de *trencadís*. Izquierda ORSONI (a1), derecha VIDALGLASS con sellado de ENDUROSIELD (b1)

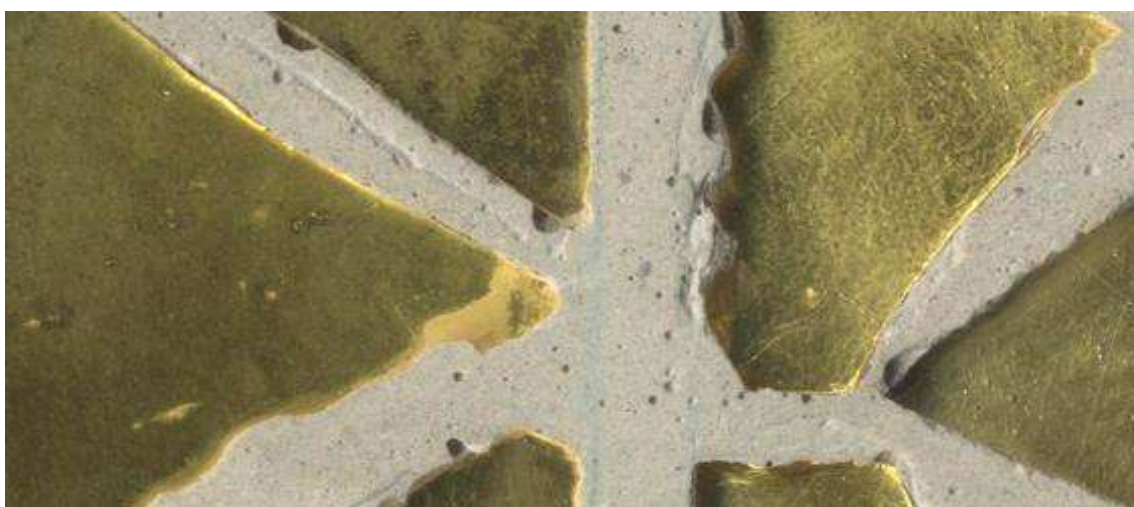


Figura 1.4 Cara Z (método de colocación prefabricado/negativo) probeta M400 - contraste entre los dos tipos de vidrio utilizado para las probetas de *trencadís*. Izquierda VIDALGLASS con sellado de EUROSIELD (b1), derecha ORSONI (a1)

B2. Grupo 2, subgrupo M4 – Observaciones iniciales

En general no se observan muchas diferencias respecto al subgrupo M2. Posiblemente al aplicar la base protectora ENDUROSIELD, las teselas de *trencadís* con vidrio VIDALGLASS alcanzan a ganar un mínimo de brillo. De resto, la utilización de este sellador no afecta ni al brillo ni a la transparencia del vidrio.

Los dos subgrupos (M2-M4) del Grupo 2, poseen similares características para la misma cara (A-Z) y zona (a-b). Pasa de igual forma en las anomalías en donde el principal origen para su aparición se halla en el corte de las *piastrelle* para crear las teselas de *trencadís*. El cuidado de este proceso es fundamental para evitar la aparición de anomalías. Además de tener en cuenta el cuidado en el proceso de corte, se aprecia que la fractura de ambos tipos de vidrio sucede de diferente manera. La fractura del vidrio de VIDALGLASS deja un corte con planos inclinados (como se observa en la figura 1.4), mientras que en el vidrio de ORSONI esto no ocurre.

El corte por cizalladura tal vez no sea el más adecuado para la durabilidad del material. Sin embargo, provoca superficies de corte con geometría compleja que favorecen la adherencia lateral entre el vidrio y el mortero, materiales que, de entrada, no son adherentes.

En las Fichas FMP se describe y se cataloga cada anomalía identificada en esta fase.

Las anomalías, en dichas fichas, están distribuidas siguiendo un orden específico:

En las seis primeras fichas se identifican las anomalías que atacan directamente a las láminas de pan de oro: rasgaduras, arrugas, fisuras, material faltante, superficie lisa, manchas y pliegues.

Las siguientes cuatro fichas contienen las diferentes anomalías que afectan a la superficie de los vidrios de protección: raspaduras, rayones, restos de materia y decapados.

A continuación, una ficha identifica la principal anomalía que se ubica entre capas: burbujas. Otra serie de cuatro fichas agrupan las anomalías que afectan a más de una capa: quiebres, pérdida de bordes, pérdida de esquinas, roturas, mancha de corte y corte irregular.

La última ficha del grupo de doce expone una anomalía que se encuentra al exterior de las teselas de *trencadís*, pero que puede afectarlas: burbujas en el mortero.

Al realizar las fichas y al hacer una agrupación de las diferentes anomalías originadas en el proceso del montaje de las probetas de *trencadís* es interesante ver que, en ocasiones, algunas anomalías afectan a un tipo de vidrio y a un sistema de colocación específico, pero hay otras que afectan al elemento independientemente de su tipo o su forma de colocación. Por ejemplo, las anomalías que afectan al pan de oro, como las rasgaduras, las arrugas, los pliegues, al igual que el material faltante, se presentan principalmente en los vidrios de VIDALGLASS sin importar la forma de colocación. Mientras que las anomalías que afectan al vidrio, como los quiebres, la pérdida de bordes y esquinas, las burbujas y el decapado, parecen afectar más a las teselas de ORSONI. Otras anomalías, como los restos de materia o las fisuras, parecen no distinguir entre ambos tipos de vidrio ni método de colocación.

Concluido esto, está clara la debilidad de cada tipo de vidrio después de haberlo montado en las probetas. VIDALGLASS es penalizado por sus láminas de pan de oro mientras que ORSONI lo hace por sus vidrios protectores, aquel de menor espesor principalmente.

Obtenido este análisis inicial, se procede a la realización de los cuatro ensayos para cada grupo de probetas de *trencadís* preparadas para tal efecto.

C. Descripción de los ensayos realizados:

Para cada uno de los ensayos que se describen a continuación, se dispone de 2 probetas de prueba. Ambas probetas poseen la misma composición, tanto en materiales como en procesos de montaje y fijación. Durante el proceso de cada ensayo, se realizarán inspecciones visuales periódicas dependiendo de los grupos a los que pertenezcan. Para las probetas del Grupo 1 y subgrupo M1 (probetas M111, M112, M121, M122, M131, M132, M141 y M142) se harán inspecciones después de los ciclos 4, 12, 21, 32 y 40; para las probetas del Grupo 2, subgrupos M2 y M4 (probetas M211, M212, M221, M222, M231, M232, M241, M242, M411, M412, M421, M422, M431, M432, M441, y M442), se realizarán las respectivas inspecciones después de los ciclos 16/32/48/64 y 80.

El análisis visual en el desarrollo de los diferentes ciclos a los cuales son sometidas las probetas es realizado por la empresa encargada de hacer los ensayos de laboratorio. Por lo cual, su veracidad y fiabilidad dependerá de ellos. Estas inspecciones periódicas son indispensables para poder identificar la resistencia de los elementos y el momento en el cual empiezan a degradarse, lo que permitirá poder aventurar la durabilidad máxima del material expuesto a las intensivas condiciones atmosféricas.

Los ensayos en laboratorio realizados son:

Choque Térmico (XT)

Probetas: **M111 y M112 / M211 y M212 / M411 y M412**

El procedimiento de este ensayo consiste en introducir las probetas en una cámara climática a una temperatura constante de $70\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas seguidas. Después de transcurrido este tiempo, la cámara climática cambia automáticamente a temperaturas de $-15\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante otras 24 horas. Sumando las 24 horas en la cámara y las otras 24 horas del congelador, se obtiene una duración de 48 horas por ciclo. Como las probetas están divididas en dos grupos (Grupo 1 y Grupo 2), se realizan ciclos diferentes. Para las 8 probetas del Grupo 1 se realiza un total de 40 ciclos (80 días) y para aquellas del Grupo 2 se realizan 80 ciclos (160 días).

a. Mojado – Secado (MS)

Probetas: **M121 y M122 / M221 y M222 / M421 y M422**

Dentro de una cámara climática, se disponen las probetas a una temperatura de $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ y se sumergen completamente en agua potable de la red durante 24 horas. Pasado este tiempo, se extraen y se colocan dentro de una cámara climática a una temperatura de $70\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas más. Sumando las 24 horas en la cámara y las 24 horas del congelador, se obtiene una duración de 48 horas por ciclo. Como las probetas están divididas en dos grupos (Grupo 1 y Grupo 2), se realizan ciclos diferentes. Para las 8 probetas del Grupo 1 se realiza un total de 40 ciclos (80 días) y para aquellas del Grupo 2 se realizan 80 ciclos (160 días).

b. Hielo – Deshielo (GD)

Probetas: **M131 y M132 / M231 y M232 / M431 y M432**

Las probetas se colocan dentro de una cámara climática a una temperatura constante de $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ y se sumergen completamente en agua potable de la red durante 24 horas. Posterior a esto se extraen y se colocan en una cámara climática a una temperatura de $-15\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas más. Sumando las 24 horas en la cámara y las 24 horas del congelador se obtiene una duración

de 48 horas por ciclo. Como las probetas están divididas en dos grupos (Grupo 1 y Grupo 2), se realizan ciclos diferentes. Para las 8 probetas del Grupo 1 se realiza un total de 40 ciclos (80 días) y para aquellas del Grupo 2 se realizan 80 ciclos (160 días).

c. Cristalización de Sales (CS)

Probetas: M141 y M142 / M241 y M242 / M441 y 442

Las probetas son colocadas dentro de una cámara climática a una temperatura constante de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ sumergidas completamente en una solución de sulfato sódico decahidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) -14% p/p en agua desionizada, durante 24 horas. Pasado este tiempo, se extraen y se colocan en una cámara climática a una temperatura constante de $70 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas más. Sumando las 24 horas en la cámara y las 24 horas del congelador se obtiene una duración de 48 horas por ciclo. Como las probetas están divididas en dos grupos (Grupo 1 y Grupo 2), se realizan ciclos diferentes. Para las 8 probetas del Grupo 1 se realiza un total de 40 ciclos (80 días) y para aquellas del Grupo 2 se realizan 80 ciclos (160 días).

D. Resultados de los diferentes ensayos:

Para poder comprobar los resultados que se exponen a continuación, ir a las fichas FPF en donde se recogen las imágenes de cada probeta, después de la experimentación, distribuidas por grupo, por ensayo y por cara.

a. Probetas expuestas al ensayo de Choque térmico (XT)

Para el ensayo de choque térmico (XT) se utilizaron seis probetas de las cuales dos pertenecen al Grupo 1 - subgrupo M1, dos al Grupo 2 – subgrupo M2 y los dos restantes al Grupo 2 – subgrupo M4.

Las probetas del Grupo 1 han sido previamente sometidas a 40 ciclos por lo cual, en este ensayo, se someten a otros 40 para completar los 80 ciclos. Para las probetas del Grupo 2 se realizan los 80 ciclos completos.

Grupo 1 – Subgrupo M1

Probetas M111 – M112⁵⁸: En el vidrio de ORSONI, tanto en la Cara A como en la cara Z, no se detectan anomalías de gran riesgo. Ambas caras presentan comportamientos muy similares con fisuras en el fondo dorado sin ninguna evolución. Algunas de las teselas de *trencadís* metálico dorado contienen burbujas entre capas y algunas otras se originan a partir de los bordes del mortero como se observa en la figura 1.5. También se detecta la aparición de algunos rayones menores en la superficie de los vidrios de protección.

En las teselas de *trencadís* hechas con el vidrio Ariplak, a partir del ciclo 32 se empieza a observar una degradación en el material dorado tanto en la Cara A como en la Cara Z. Esta degradación se evidencia por la presencia de manchas que abarcan gran superficie. Estas manchas se presentan principalmente en la Cara Z e inician desde los bordes, desarrollándose hacia el centro.

Grupo 2 – Subgrupo M2

Probeta M211: En la cara A no se aprecia ninguna evolución o cambio en los diferentes ciclos, pero al hacer un análisis táctil de la rugosidad de la superficie, esta parece haber aumentado considerablemente. En la Cara Z, el mortero de rejuntado se erosiona en toda la probeta y específicamente en el vidrio de ORSONI se observa una degradación del material dorado a partir del ciclo 64. La degradación se detecta por la aparición de manchas como se observa en la figura 1.7⁵⁹.

Probeta M212⁶⁰: En las teselas de ORSONI de la Cara A el material dorado presenta un mayor número de fisuras pero que no evolucionan mientras que, en las teselas de VIDALGLASS se observa la presencia de fisuras en el material dorado a partir del ciclo 48, formando una especie de arrugas que se empiezan a desarrollar desde los bordes desde donde también empieza a desaparecer la lámina de pan de oro por capas como se observa en la figura 1.6. En cuanto a la Cara Z, las teselas de ORSONI presentan la fisuración del vidrio en el ciclo 48 y el mortero de

⁵⁸ Ficha 1/12 del grupo de fichas FPF

⁵⁹ Las manchas son un signo de la degradación ya que otro material empieza a reemplazar área de la superficie dorada

⁶⁰ Ficha 2/12 del grupo de fichas FPF

rejuntado se va erosionando con el paso de los ciclos. A partir del ciclo 64, el material dorado de las teselas de VIDALGLASS empieza a degradarse de igual manera que en la Cara A, por capas.

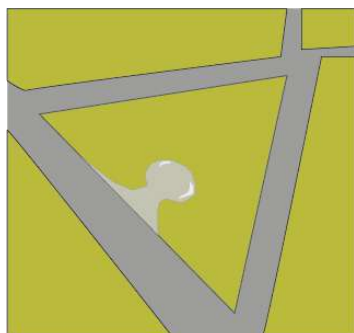


Figura 1.5 Burbuja desde el borde

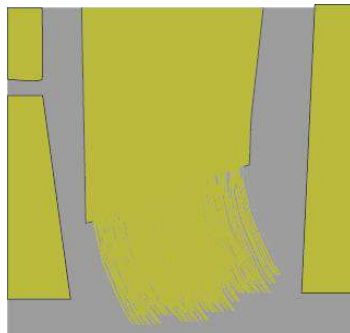


Figura 1.6 Degradado por capas

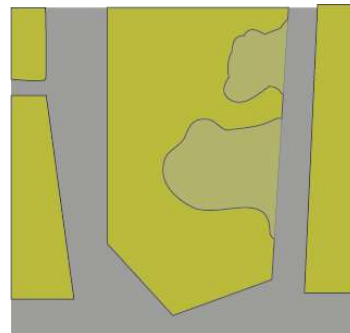


Figura 1.7 Degradado directo

Grupo 2 – Subgrupo M4

Probeta M411⁶¹: En la Cara A las teselas de *trencadís* del vidrio metálico dorado de ORSONI presentan más fisuras en su componente dorado respecto al vidrio de VIDALGLASS, cuyas piezas presentan una degradación menor, la cual empieza a suceder a partir del ciclo 64. A parte de la degradación por pérdida de material, el dorado de VIDALGLASS presenta diferentes rasgaduras en algunas de sus zonas. El vidrio dorado de VIDALGLASS en la Cara Z presenta la degradación del mortero de rejuntado y el material dorado se empieza a degradar a partir del ciclo 64 con la aparición de manchas.

Probeta M412: A partir del ciclo 64 se aprecia la degradación del fondo dorado en las teselas de ORSONI de la Cara A, mientras que en las teselas de VIDALGLASS se observa la aparición de fisuras en el material dorado a partir del ciclo 32. En la Cara Z a partir del ciclo 48 se empieza a degradar el mortero de rejuntado.

b. Probetas expuestas al ensayo de Mojado-Secado (MS)

Para el ensayo de Mojado-Secado (MS) se utilizaron seis probetas de las cuales dos pertenecen al Grupo 1 - subgrupo M1, dos al Grupo 2 – subgrupo M2 y los dos restantes al Grupo 2 – subgrupo M4.

Las probetas del Grupo 1 han sido previamente sometidas a 40 ciclos por lo cual, en este ensayo, se someten a otros 40 para completar los 80 ciclos. Para las probetas del Grupo 2 se realizan los 80 ciclos completos.

Grupo 1 – Subgrupo M1

Probeta M121⁶²: En la Cara A, las teselas de *trencadís* de ORSONI presentan restos de materia sobre la superficie con algunas fisuras en el fondo dorado mientras que en la Cara Z, la degradación se da en el material dorado a partir de manchas. La superficie de la Cara Z se encuentra en mejor estado respecto a la Cara A pero, por el contrario, presenta un porcentaje elevado de degradación en el material dorado sumado a la erosión del mortero en toda la probeta. La degradación del material dorado del vidrio de ORSONI se produce a partir de

⁶¹ Ficha 3/12 del grupo de fichas FPF

⁶² Ficha 4/12 del grupo de fichas FPF

material que se va consumiendo como puntos muy pequeños, los cuales, a medida que pasa el tiempo, van aumentando en cantidad hasta generar las manchas de pérdida de material. Esta evolución del desarrollo de las manchas se puede observar en la figura 1.8.

La zona correspondiente al vidrio de Ariplak presenta roturas de piezas en ambas caras. Esto es debido a la tensión generada en toda la estructura del mortero y, debido a la resistencia de la cerámica, el vidrio es quien realiza todo el esfuerzo, obteniendo como resultado la fragmentación.

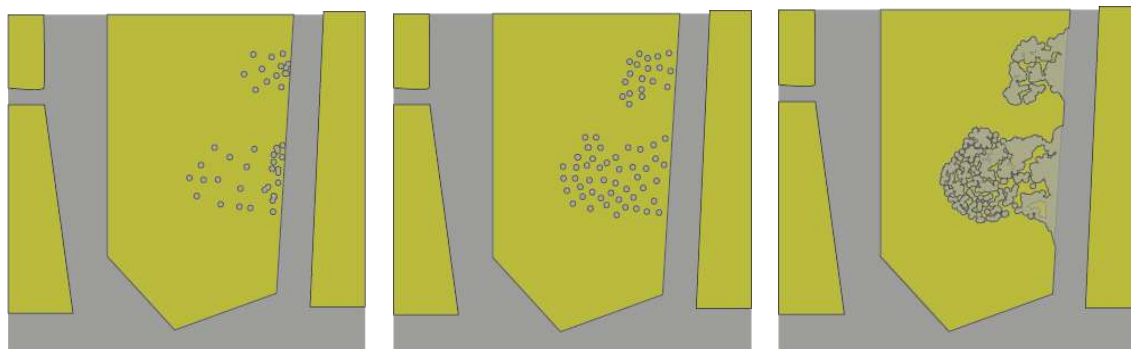


Figura 1.8 Evolución del degradado (manchas de izq. a der.) de la lámina de pan de oro del vidrio de ORSONI

Probeta M122: A medida que los ciclos avanzan, se va depositando patina en ambas caras lo que afecta la transparencia y el brillo del vidrio metálico dorado. La acción del depósito de restos de materia se comporta muy diferente en las dos caras. En la Cara A, las teselas de *trencadís* que resultan más afectadas son las que se ubican en los bordes mientras que las centrales presentan menos daños. De manera contraria ocurre en la Cara Z, las teselas más afectadas son las que se ubican en la zona central.

Los depósitos de materia sobre la superficie parecen tener un patrón en donde los restos de la Cara A se depositan a partir de los bordes, y cuando el lado más largo de las teselas de *trencadís* es colocado verticalmente, la materia se desarrolla en forma descendente por el área central. En la Cara Z esto no sucede. Esto puede deberse a que se trata del mismo vidrio, pero colocado por lados contrarios, y la estructura química de cada uno es diferente.

En la Cara A, las teselas de *trencadís* de vidrio de Ariplak, presentan restos de materia en la superficie, sobre todo en las piezas de los extremos. Sumado a esto, la presencia de manchas en el fondo genera la pérdida total del brillo de este tipo de vidrio.

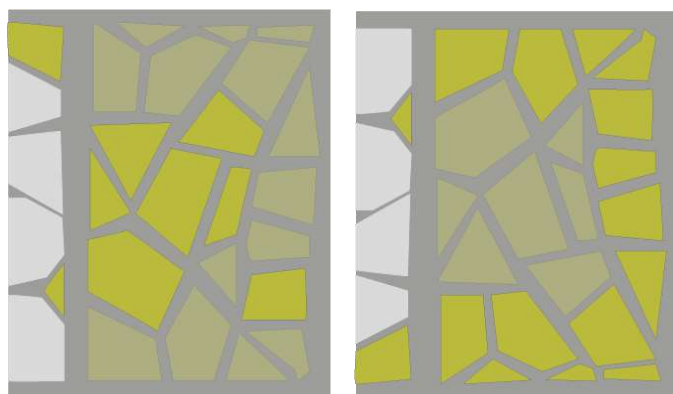


Figura 1.9 Patrones de degradación por depósito de restos de materia sobre la superficie. Izq.: Cara A, Der.: Cara Z

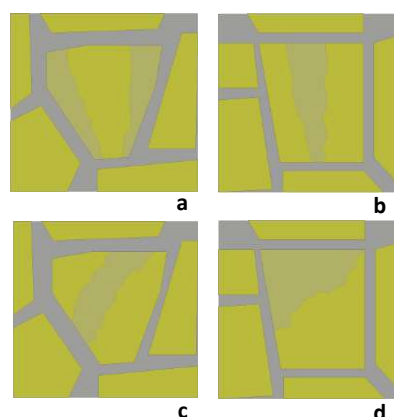


Figura 1.10 Patrones de depósito de restos de materia en superficie

Grupo 2 – Subgrupo M2

Probeta M221⁶³: A partir del ciclo 48, la Cara A sufre la rotura de una tesela como consecuencia de la fractura del mortero. Tanto en la Cara A como en la Cara Z, se presenta una degradación similar de material dorado. No existe una diferenciación muy notoria entre el comportamiento del vidrio de ORSONI y el vidrio de VIDALGLASS. En la Cara A se evidencia nuevamente la diferencia que existe entre la degradación por puntos del material dorado de ORSONI contra la degradación por capas de VIDALGLASS (ver figuras 1.8 y 1.11). El material dorado de las teselas de *trencadís* de VIDALGLASS de la Cara Z presenta muy pocas fisuras, pero mucha más degradación con la consecuente pérdida de material. La Cara A se encuentra en peor estado respecto a la Cara Z y, en donde mejor se refleja esta situación, es por la pérdida del brillo de gran parte de las teselas de *trencadís*.

Probeta M222: A partir del ciclo 48 se empieza a degradar el material dorado. En ambas caras y zonas se va depositando poco a poco una pátina, pero en la Cara A es en donde se presenta mayormente. Mientras, en la Cara Z, el material dorado es quien sufre mayor afectación por la generación de manchas. Se evidencian burbujas entre capas en los vidrios de ORSONI.

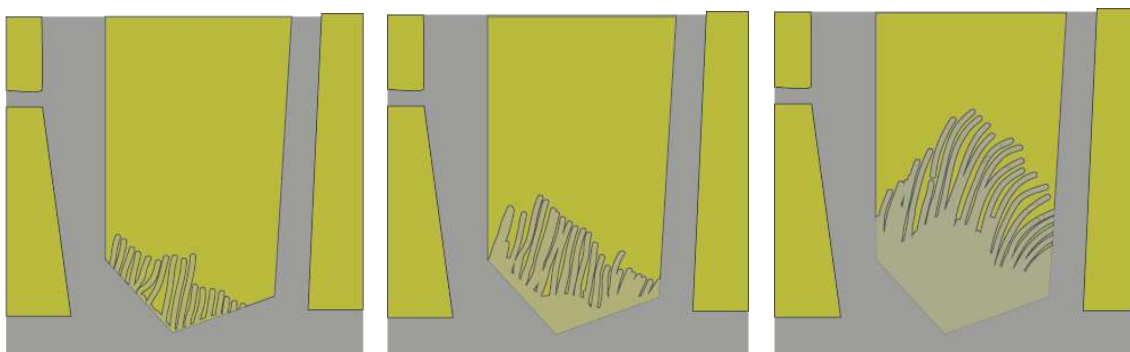


Figura 1.11 Evolución del degradado (manchas de izquierda a derecha) de la lámina de pan de oro del vidrio de VIDALGLASS

Grupo 2 – Subgrupo M4

Probeta M421⁶⁴: A partir del ciclo 48, se empieza a degradar el material dorado y se va depositando pátina⁶⁵ en la superficie de la Cara A, creando diferentes tipos de manchas. El depósito de restos de materia se localiza principalmente en las teselas de *trencadís* que están en los extremos, dejando el centro más protegido, y en la Cara Z las piezas más pequeñas son las que sufren el ataque. A partir del ciclo 64 empieza a haber una degradación del material dorado en la Cara Z. En la Cara A, el fondo dorado del vidrio de ORSONI presenta manchas que abarcan gran superficie del material dorado.

Probeta M422: Tanto en la Cara A como en la Cara Z se repite el depósito de patina en la superficie y la degradación del material dorado a partir del ciclo 48. Las teselas de *trencadís* de VIDALGLASS en ambas caras, muestran comportamientos muy similares diferenciándose el porcentaje mayor de restos de materia sobre la superficie de la Cara A y la degradación mayor del material dorado de la Cara Z.

⁶³ Ficha 5/12 del grupo de fichas FPF

⁶⁴ Ficha 6/12 del grupo de fichas FPF

⁶⁵ La pátina se trata de la conformación de una capa fina sobre la superficie el vidrio. En algunos párrafos se puede también encontrar con el nombre de “capa de gel”

El fondo del material dorado de VIDALGLASS presenta dos tipos de rasgadura de diferentes tamaños que generan pérdida. Por un lado, están las rasgaduras de tipo lineal y por otro las de tipo puntual. Si se hace una aproximación en el último tipo de rasgadura, la forma que tienen estas es de punta de lanza (ver figura 1.13), en donde, a partir de un vértice, se genera la rasgadura. El material dorado del vidrio de ORSONI también tiene este tipo de rasgadura, pero de un tamaño mucho menor.

La calidad del brillo de VIDALGLASS es mucho mejor respecto a la de ORSONI en la Cara A, ya que las teselas de *trencadís* de este último sufrieron mucho porcentaje de depósito de resto de materia en la superficie del vidrio.

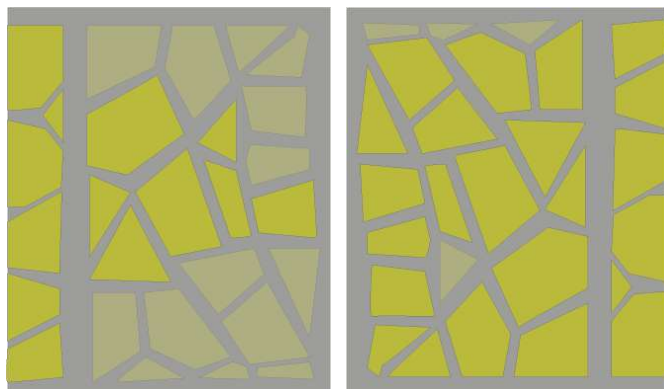


Figura 1.12 Patrones de degradación por depósito de restos de materia sobre la superficie. Izq.: Cara A, Der.: Cara Z

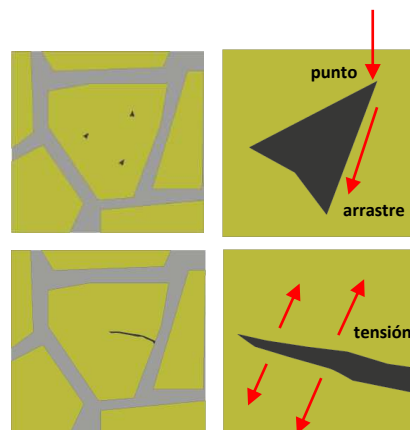


Figura 1.13 Tipos de rasgaduras
Arriba: puntual, Abajo: lineal

c. Probetas expuestas al ensayo de Hielo-Deshielo (GD)

Para el ensayo de Hielo-Deshielo (GD) se utilizaron seis probetas de las cuales dos pertenecen al Grupo 1 - subgrupo M1, dos al Grupo 2 – subgrupo M2 y los dos restantes al Grupo 2 – subgrupo M4.

Las probetas del Grupo 1 han sido previamente sometidas a 40 ciclos, por lo cual en este ensayo se someten a otros 40 para completar los 80 ciclos. Para las probetas del Grupo 2 se realizan los 80 ciclos completos.

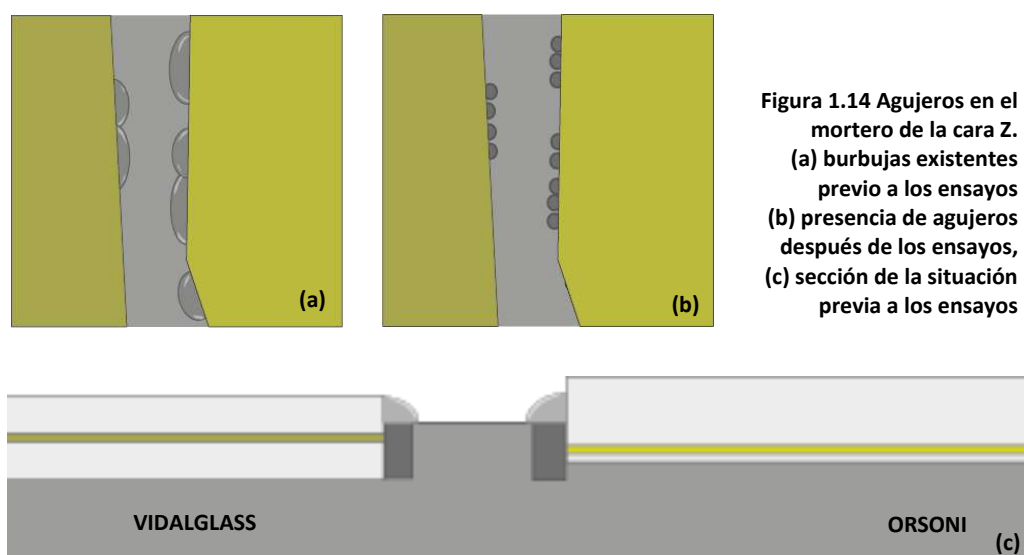
Grupo 1 – Subgrupo M1

Probeta M131: Tanto en la superficie del vidrio de ORSONI, como en la superficie del vidrio de Ariplak, a partir del ciclo 21 se empiezan a depositar residuos de pátina derivada del polvo de cemento del mortero sobre todo en la Cara A. Las fisuras en el material dorado también se presentan en las dos caras, pero con una notable presencia mayor en la Cara A. Los bordes de las piezas de *trencadís* de vidrio dorado de ORSONI sobresalen más y están más expuestos en la aplicación manual (Cara A) que en la prefabricada (Cara Z). Esta situación puede deberse a que el mortero haya sufrido mayor desgaste, lo que ha descubierto los bordes de las piezas de *trencadís*. Este hecho ha favorecido la aparición de otra serie de anomalías que se presentan en los bordes, como la pérdida de material tanto vítreo como dorado. En general, la superficie de la Cara A se encuentra en peor estado para los dos tipos de vidrio. En el fondo del vidrio dorado se presenta una situación extraña; el material dorado de Ariplak presenta un deterioro mayor en ambas caras, pero con mucha más intensidad en la cara Z. Mientras que, en la Cara A, se presentan roturas en el vidrio de fondo.

Probeta M132⁶⁶: A partir del ciclo 21 se empieza a depositar una pátina en la superficie derivada del polvo de cemento del mortero. Tanto en la Cara A como en la Cara B se observa la existencia de micro fisuras, pero sin ninguna evolución. El vidrio de Ariplak ha perdido el brillo en ambas caras.

Grupo 2 – Subgrupo M2

Probeta M231⁶⁷: En la superficie de ambas caras del vidrio metálico dorado de ORSONI se observa la presencia de pátina. Esta anomalía no se evidencia en la Cara Z. El material dorado del vidrio metálico dorado de VIDALGLASS posee diferentes tipos de rasgaduras en ambas caras y a partir del ciclo 32 se empiezan a presentar fisuras con la posterior degradación por capas, como se observa en las figuras 1.6 y 1.11. Entre los dos tipos de vidrio metálico dorado, el material dorado de ORSONI parece resistir mejor que el de VIDALGLASS. Por el contrario, la superficie del vidrio de VIDALGLASS es más lisa respecto a la de ORSONI, por lo que presenta menos cantidad de restos de materia y, además, se deposita de forma diferente como se ve en la figura 1.15, lo que facilita su limpieza.



En la Cara Z, con el montaje de la técnica prefabricada, se observa la aparición de agujeros en el mortero, pero que no evolucionan. Estos agujeros, en la fase previa a los ensayos, no se observaban, ya que estaban cubiertos por las burbujas que aparecían en el mortero junto a los bordes de las teselas de *trencadís*. Es un problema que se genera a la hora de la fabricación de las probetas y esto aumenta el riesgo de generación de otro tipo de anomalías, ya que los bordes están quedando expuestos al ataque de cualquier tipo de agente contaminante. Como se observa en la imagen (c) la figura 1.14, en el vidrio de ORSONI, al quedar unos milímetros por encima respecto al vidrio de VIDALGLASS, las burbujas no alcanzan a ocupar todo el borde completo y no llegan a la superficie del vidrio de protección. Sin embargo, el poro abierto puede tener una profundidad lo bastante grande como para poder atacar el material desde el vidrio soplado de base.

⁶⁶ Ficha 7/12 del grupo de fichas FPF

⁶⁷ Ficha 8/12 del grupo de fichas FPF

Probeta M232: En la cara A, el material dorado del vidrio metálico de ORSONI presenta una ligera degradación en su material dorado mientras que en el del vidrio de VIDALGLASS, a partir del ciclo 32 aparecen fisuras. En la Cara Z, ambos tipos de vidrio poseen una ligera degradación del material dorado.



Figura 1.15 Depósito de restos de materia sobre la superficie del vidrio. (a) depósito de tipo granulado (a1 sección), (b) depósito de tipo gel (b1 sección)
Arriba: puntual, Abajo: lineal

Grupo 2 – Subgrupo M4

Probeta M431⁶⁸: En el vidrio metálico dorado de ORSONI, en la Cara A, se observa el depósito de pátina derivado del polvo del cemento además de diferentes ataques a la superficie del vidrio. Se evidencia una ligera degradación del fondo dorado en ambas caras y zonas, pero en el vidrio de VIDALGLASS con la protección de ENDUROSHIELD, aparecen una serie de rasgaduras y pérdida de material en las láminas de pan de oro en las dos caras. El fondo del material sigue comportándose de manera muy similar que en el subgrupo M2, sin embargo, se nota una mejoría en la superficie de los vidrios de VIDALGLASS.

Probeta M432: Tanto en la Cara A como en la Cara Z se presenta una ligera degradación del material dorado del vidrio de ORSONI con la presencia de rayones en la superficie, sobre todo en la cara A. Los bordes de las teselas de *trencadís* están mucho más expuestos en la cara A posiblemente debido a la degradación del mortero. La cara Z, con la técnica prefabricada, muestra diferentes agujeros, como se expone en la figura 1.14. En ambas caras del vidrio de VIDALGLASS, se observa la presencia de fisuras que no evolucionan en el material dorado.

d. Probetas expuestas al ensayo de Cristalización de Sales (CS)

Para el ensayo de **Cristalización de Sales (CS)** se utilizaron seis probetas de las cuales dos pertenecen al Grupo 1 - subgrupo M1, dos al Grupo 2 – subgrupo M2 y los dos restantes al Grupo 2 – subgrupo M4.

Las probetas del Grupo 1 han sido previamente sometidas a 40 ciclos, por lo cual, en este ensayo, se someten a otros 40 para completar los 80 ciclos. Para las probetas del Grupo 2 se realizan los 80 ciclos completos.

Grupo 1 – Subgrupo M1

Probeta M141⁶⁹: En la cara A, el material dorado del vidrio metálico dorado de ORSONI se va agrietando y degradando a medida que pasan los ciclos. En la cara Z también ocurre esta situación, pero las grietas son mucho más pequeñas y se evidencian menos. Esta situación se

⁶⁸ Ficha 9/12 del grupo de fichas FPF

⁶⁹ Ficha 10/12 del grupo de fichas FPF

debe a que las sales logran filtrarse por medio de las capas y se ubican sobre el material dorado, en donde empiezan a degradarlo. Ocurre más en la cara A que en la Z. En la cara Z, algunos vidrios sufren la rotura y algunas de las superficies se decapan, ya que las sales son de los minerales compuestos que más corroen la superficie del vidrio. A partir del ciclo 21, los vidrios de protección del fondo de las teselas de vidrio metálico dorado de Ariplak, parece estar empañado, lo que ocasiona la pérdida del brillo en las teselas de *trencadís*. En la Cara Z se presencian las mismas características que en la Cara A, pero, además, el mortero de base del vidrio de ORSONI se erosiona, y secciones del mortero de base del vidrio de Ariplak se desprenden. El mortero de la zona de Ariplak sufre mayor daño debido a la resistencia mayor de las piezas cerámicas al ataque de sales. El mortero llega a su límite de rotura debido a las tensiones que recibe por parte de las cerámicas y las grietas ocasionadas que se desplazan hacia la zona del vidrio de ORSONI (ver figura 1.16). El equilibrio de resistencia entre las teselas de vidrio metálico dorado de ORSONI y el mortero es mejor respecto al conjunto de piezas de cerámica, vidrio Ariplak y mortero.

La situación del ataque de las sales a las láminas de pan de oro en los vidrios de ORSONI, se puede ver en la figura 1.17. En las teselas de vidrio metálico dorado de *trencadís* colocadas mediante el método manual, las sales abarcan más área, pero están menos concentradas. Las sales han podido recorrer más superficie con facilidad. Por el contrario, en la cara Z, las sales ocupan menos área ya que se concentran en determinadas zonas.

Probeta M142: En la cara A, el material dorado de las teselas de *trencadís* de ORSONI se va degradando a medida que pasan los ciclos de igual forma que en la cara Z, en donde, además, aparecen fisuras entre el mortero y las teselas. Los vidrios de protección en el fondo de las teselas de vidrio metálico dorado de Ariplak se degrada y se crean fisuras entre el mortero y las teselas. Es un ataque combinado

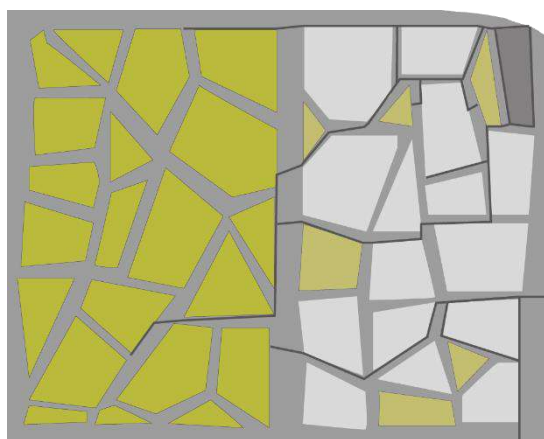


Figura 1.16 Origen y prolongación de las grietas desde la cara con vidrio Ariplak + cerámica

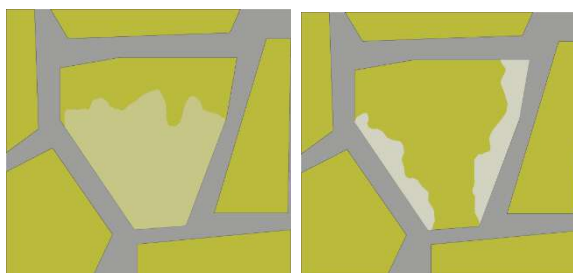


Figura 1.17 Depósito y concentración de las sales sobre la lámina de pan de oro. Izq.: cara A, Der.: Cara Z

Grupo 2 – Subgrupo M2

Probeta M241⁷⁰: A partir del ciclo 32 se produce la degradación de todos los componentes en ambas caras y en las dos zonas. La resistencia de la superficie y la adherencia al mortero de las teselas de *trencadís* del vidrio metálico dorado de VIDALGLASS parecen resistir mejor a los ataques, aunque con algunas fracturas, muy posiblemente debido a la simetría de espesor en los dos vidrios de protección. Entre las dos caras de la probeta, la adherencia de las teselas de

⁷⁰ Ficha 11/12 del grupo de fichas FPF

la cara A ha sido mucho mejor respecto a la de la cara Z, en donde son muy pocos los elementos que han quedado adheridos al mortero. Lo mismo ocurre con el material dorado, el cual resulta casi completamente eliminado de las piezas que aún continúan adheridas. El mortero de rejuntado permanece en esta cara y no se ha desprendido con las teselas de *trencadís*, ya que, al tratarse del método prefabricado, el mortero utilizado fue de un solo tipo (ver figura 1.18). En las teselas de vidrio metálico dorado de VIDALGLASS, al igual que en los demás tipos de ensayo, la lámina de pan de oro se va perdiendo por capas como se observa en la figura 1.19 (se interpreta que la lámina de pan de oro está compuesta por dos capas debido a la forma de degradación). Por otro lado, las teselas de *trencadís* realizadas con el vidrio metálico dorado de ORSONI, resisten mejor en la cara A que en la Z y todas las piezas continúan adheridas como ya se mencionó antes. El elemento dorado resulta agrietado, ya que, a diferencia del vidrio de VIDALGLASS, está compuesto solamente por una capa y con materiales diversos. La evolución de las grietas se forman como se indica en la figura 1.8, pero en vez de crearse zonas de manchas, se crean líneas de grieta como se observa en la figura 1.19 debido a la mezcla entre el material dorado, las sales y los demás minerales que se arrastraron hacia el interior.

La transparencia de los vidrios se ha visto reducida debido a la corrosión por la exposición del vidrio a las sales. A diferencia de las probetas de los otros ensayos, en este caso, los bordes de las teselas de *trencadís* no resultan tan expuestos, por lo que el principal ataque se produce en el interior del vidrio metálico dorado y no desde el exterior. Como se puede observar en la figura 1.20, en algunas teselas de los dos tipos de vidrio metálico dorado, el vidrio de protección exterior se ha desprendido, pero el vidrio de base continúa adherido al mortero. Esto confirma la teoría de un ataque con efectos expansivos y desadherentes en el interior de las capas. En la figura 1.21 se pueden observar las fracturas que se producen en los vidrios que hacen contacto con la base del mortero en donde, el vidrio protector de VIDALGLASS, cuando sufre una fractura, se produce solo un corte principal debido a su mayor espesor y a su tratamiento mientras que el vidrio de protección soplado de ORSONI presenta diferentes micro fracturas como si se tratase de un material como el pergamino. Esta condición denota que la adherencia del vidrio de ORSONI, de menor espesor, es de mejor adherencia, ya que es más maleable y se amolda al mortero de base. El vidrio exterior se desprende debido a las formas del relieve del mortero de base, pero también a su peso superficial.



Figura 1.18 Forma de desprendimiento del mortero.
Izquierda: cara A, VIDALGLASS (manual), Derecha: cara Z, VIDALGLASS (prefabricado)

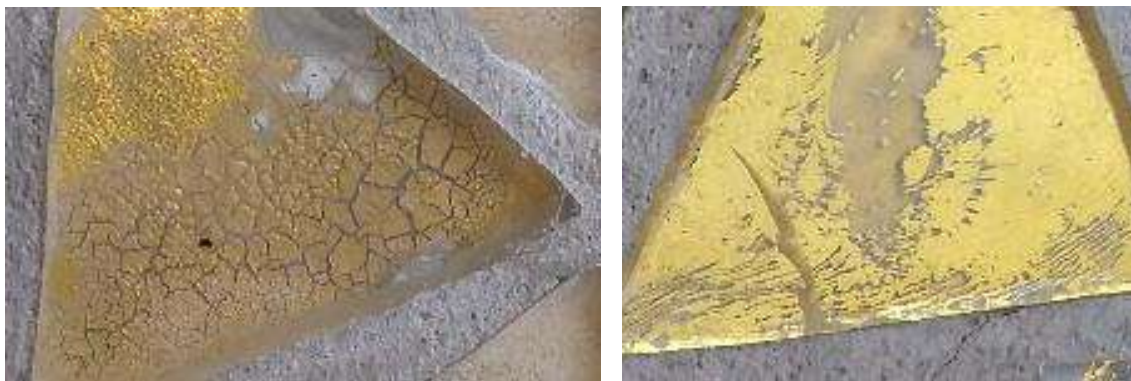


Figura 1.19 Forma de degradación.
Izquierda: cara A, ORSONI (por puntos-grietas), Derecha: cara Z, VIDALGLASS (por capas)



Figura 1.20 Adherencia de los vidrios de protección de base en la cara A del subgrupo M4 (ataque interno).
Izquierda: vidrio de protección VIDALGLASS, Derecha: vidrio de protección ORSONI



Figura 1.21 Fracturas producidas en el vidrio de fondo.
Izquierda: vidrio de protección VIDALGLASS (corte), Derecha: vidrio de protección ORSONI (quiebre)

Probeta M242: Es la probeta que se encuentra en peores condiciones de manera particular por la erosión, con el posterior desprendimiento de una sección de la probeta en la zona del vidrio metálico dorado de VIDALGLASS. A partir del ciclo 32 se produce la degradación de todos los componentes en ambas caras y en ambas zonas. El vidrio protector de las teselas de *trencadís* de ORSONI presenta una mejor adherencia aunque también una gran pérdida del material

dorado, ya que, como se observaba en la figura 1.17, las sales lograban abarcar más superficie. Por el contrario, el vidrio metálico dorado de VIDALGLASS presenta una mejor conservación del material dorado, pero los vidrios de protección resultan fisurados. Esto puede deberse a que son vidrios más rígidos que los de ORSONI por lo que son más lisos, pero, a la hora de recibir tensiones, su límite de rotura es más bajo. La cara A presenta mejores condiciones de brillo.

Grupo 2 – Subgrupo M4

Probeta M441⁷¹: La cara A se encuentra en mejor estado. Casi la totalidad de las teselas de *trencadís* lograron resistir la exposición a la cristalización de sales. Solamente las piezas de los extremos se vieron afectadas por la pérdida de uno de sus vidrios de protección, debido a que las esquinas son las zonas donde más se concentran las tensiones (figura 1.20). La zona central de la cara A de las teselas de *trencadís* de vidrio de VIDALGLASS con protección ENDUROSHIELD, también fueron víctima de las tensiones las cuales, en vez de generar el desprendimiento, produjeron la rotura (ver figura 1.22). A partir del ciclo 32 se produce la degradación de todos los componentes en ambas caras y zonas. En la cara Z todas las teselas de *trencadís* sucumbieron al ataque de las sales y se desprendieron. Las juntas de mortero fueron las únicas que permanecieron en su lugar.

Probeta M442: A partir del ciclo 32 se produce la degradación de todos los componentes en ambas caras y en ambas zonas. Aunque el estado en general de la probeta es malo, la cara A soportó mucho mejor el ataque. Se repite la misma situación de la probeta M441, en donde la adherencia de las teselas de *trencadís* del vidrio de ORSONI es mejor que la de las de VIDALGLASS, pero el material dorado está mucho más degradado y brilla menos.

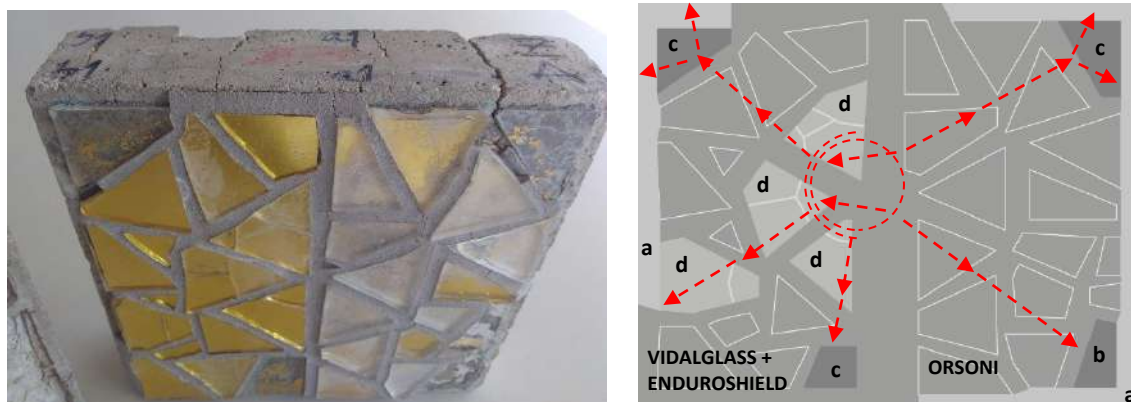


Figura 1.22 Roturas y desprendimientos producidos por las tensiones.
Izquierda: probeta M442, Derecha: Esquema de la distribución de tensiones.
a. borde de mortero levantado, b. pieza levantada, c. vidrio de protección levantado, d. piezas fracturadas

Nota de final de apartado: la descripción de cada par de probetas vale para ambas. Se ha diferenciado cada probeta, ya que la aparición de anomalías cambiaba en algunos ciclos, además de algunas características puntuales que no se repetían en la pareja. Las imágenes completas de todas las probetas se encuentran en el grupo de fichas FPF.

⁷¹ Ficha 12/12 del grupo de fichas FPF

D.1. Resultados de la valoración de las probetas después de completar 80 ciclos de ensayos de envejecimiento acelerado en laboratorio

a1. RESULTADOS – CARA A				a2. RESULTADOS – CARA Z			
GRUPO / (XT)		ASPECTO	MECÁNICA	GRUPO / (XT)		ASPECTO	MECÁNICA
M1	a	3	3	M1	a	3	3
	b	3	3		b	2	3
M2	a	3	4	M2	a	3	3
	b	3	4		b	2	3
M4	a	3	4	M4	a	3	4
	b	3	4		b	4	4

b1. RESULTADOS – CARA A				b2. RESULTADOS – CARA Z			
GRUPO / (MS)		ASPECTO	MECÁNICA	GRUPO / (MS)		ASPECTO	MECÁNICA
M1	a	2	3	M1	a	2	3
	b	2	3		b	2	3
M2	a	3	3	M2	a	2	3
	b	2	3		b	2	3
M4	a	2	3	M4	a	2	3
	b	3	4		b	2	4

c1. RESULTADOS – CARA A				c2. RESULTADOS – CARA Z			
GRUPO / (HD)		ASPECTO	MECÁNICA	GRUPO / (HD)		ASPECTO	MECÁNICA
M1	a	2	3	M1	a	2	3
	b	1	3		b	1	3
M2	a	3	4	M2	a	3	4
	b	3	3		b	3	4
M4	a	3	3	M4	a	3	3
	b	3	4		b	3	4

d1. RESULTADOS – CARA A				d2. RESULTADOS – CARA Z			
GRUPO / (CS)		ASPECTO	MECÁNICA	GRUPO / (CS)		ASPECTO	MECÁNICA
M1	a	1	2	M1	a	1	2
	b	2	2		b	1	2
M2	a	1	1	M2	a	1	1
	b	1	1		b	1	1
M4	a	2	2	M4	a	1	1
	b	1	2		b	1	1

Ficha 1.23 Resultados de la valoración de las probetas después de completar 80 ciclos

Se realiza una valoración cuantitativa de las probetas después de haber completado los 80 ciclos de ensayos de envejecimiento acelerado en laboratorio.

Se realizó la valoración final para las dos características principales de las probetas: aspecto (brillo) y mecánica (resistencia y adherencia). Como se puede observar en las tablas de resultados, el grupo de probetas que tuvo peores resultados frente a los ataques en laboratorio fueron las de la Cara Z sometidas a Cristalización de Sales. Vale la pena recordar que en esta probeta y en esta cara, las teselas de *trencadís* utilizadas fueron de ORSONI y VIDALGLASS + ENDUROSIELD colocadas mediante el método prefabricado, en posición negativo. Tanto el aspecto como la mecánica arrojaron malos resultados, ya que las sales son el principal agente de corrosión del vidrio y, además, gracias a la porosidad del mortero utilizado y a la existencia de agujeros en él, se facilitó la penetración de estos minerales con la posterior degradación de las láminas de pan de oro. Las probetas que mejores resultados obtuvieron fueron las sometidas al ensayo de choque térmico, ya que el vidrio y la lámina de pan de oro tienen buen comportamiento en conjunto a la subida y bajada de temperaturas.⁷²

⁷² Para ver la valoración de las probetas completa, ir al grupo de fichas FVF

D.2. Gráficos comparativos

Los gráficos comparativos son el resultado gráfico de los análisis cuantitativos que se realizaron en diferentes momentos para poder obtener un esquema que muestra la evolución del comportamiento del vidrio metálico dorado al pasar por los diferentes ciclos de los diferentes ensayos de envejecimiento acelerado realizados. Es una manera visual de poder comparar y valorar los resultados de cada grupo de probetas.

En los gráficos se reflejan los dos aspectos principales del vidrio metálico dorado: el aspecto y la mecánica. Los puntos que se introducen son los resultados cuantitativos obtenidos de las tablas de valoración de las probetas, tanto en la fase inicial⁷³, como en la fase final⁷⁴ de los ensayos. Algunos valores en fases intermedias fueron proporcionados por el laboratorio encargado de realizar las pruebas.

Los gráficos se representan en un plano cartesiano, en donde, el eje de las abscisas corresponde a los diferentes ciclos de los ensayos de laboratorio (80 ciclos), y el eje de las ordenadas, el rango de valoración, con un 5 para el mejor estado y 1 para el peor. Existe el eje cero para el grupo de las ordenadas, pero es meramente un detalle gráfico.

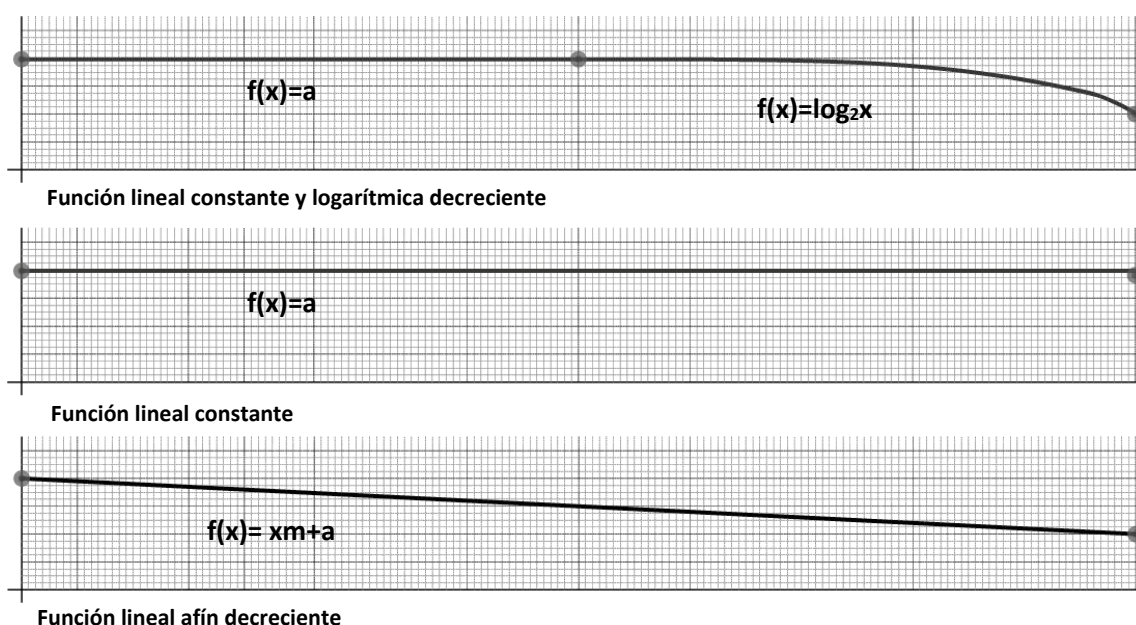


Figura 1.24 – tipos de función de la evolución de la anomalía a lo largo del tiempo

Como se observa en la figura 1.24, existen tres tipos de funciones que representan el comportamiento de los diferentes grupos de probetas. La primera función (de arriba abajo) se trata de un elemento que posee un comportamiento lineal constante ($f(x)=a$) a lo largo de los ciclos hasta que llegado un punto empieza a deteriorarse de forma logarítmica ($f(x)=\log_2 x$) y decreciente. El segundo tipo de comportamiento se trata de una función lineal constante ($f(x)=a$), ya que sufre cambios mínimos a medida que transcurren los ciclos. El último tipo se trata de una función lineal afín ($f(x)=xm+a$), pero es decreciente, ya que a lo largo de los ciclos el material se va deteriorando. Este último tipo de evolución se traza debido a que no se tiene un registro puntual del momento en el cual los materiales empezaron a deteriorarse.

⁷³ Ver el grupo de fichas FVI

⁷⁴ Ver el grupo de fichas FVI

Lectura de los gráficos

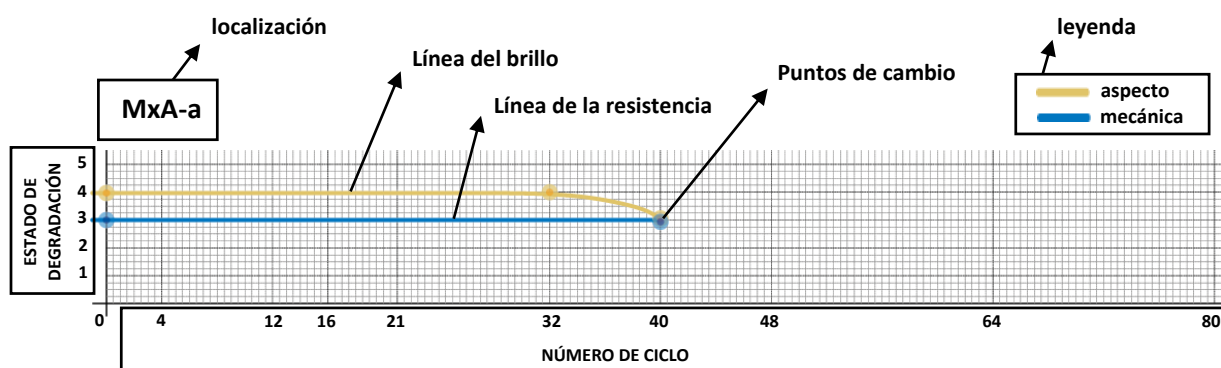


Figura 1.25 Ejemplo para la interpretación de los gráficos

Localización del análisis

MxA-a

Mx= Grupo de la probeta
A= Cara de la probeta
a= Zona dentro de la cara

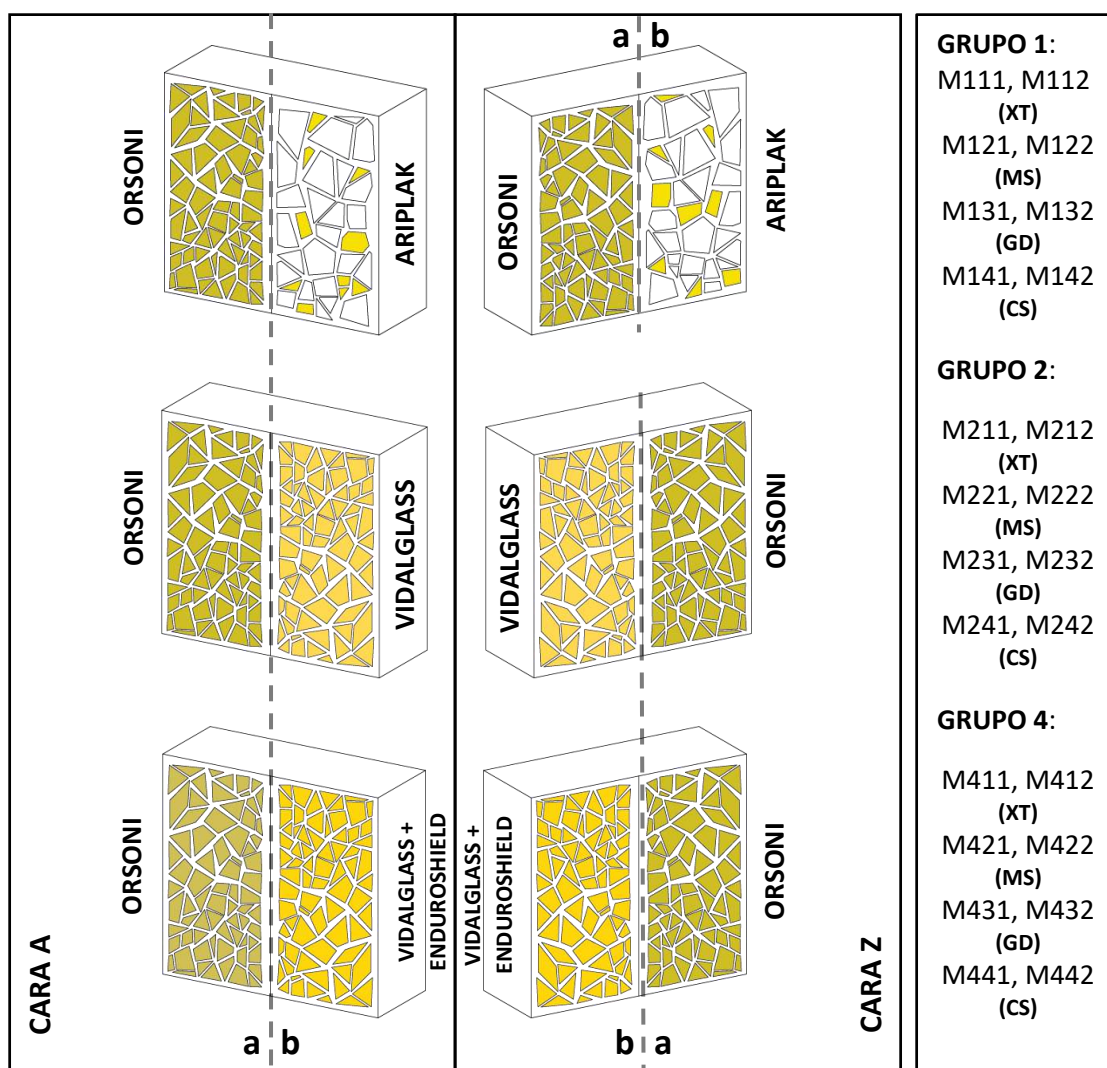


Figura 1.26 Resumen de probetas para análisis

a. Choque térmico (XT)

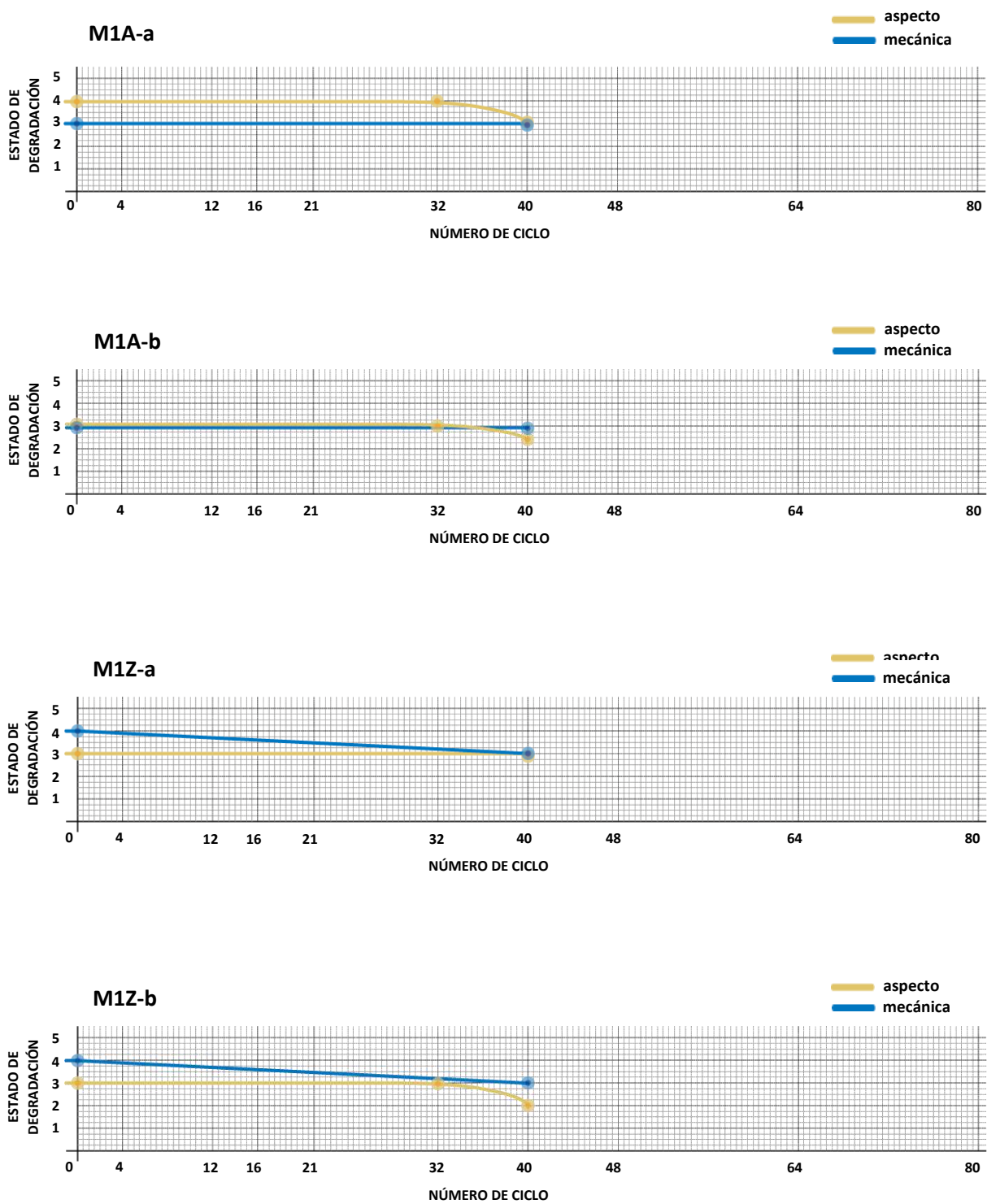


Figura 1.27 Gráficos de la evolución de las muestras sometidas a los ensayos de laboratorio

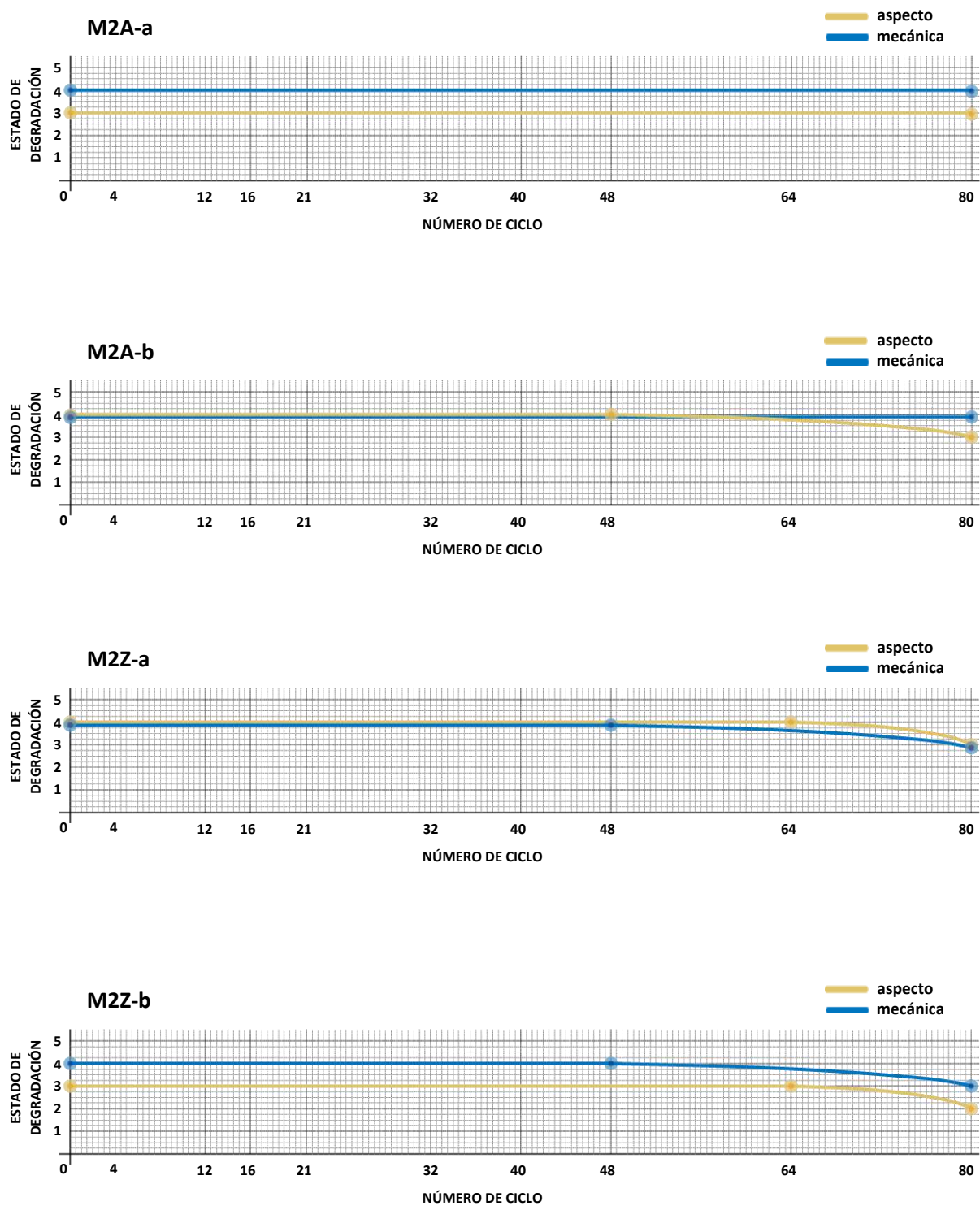


Figura 1.28 Gráficos de la evolución de las muestras sometidas a los ensayos de laboratorio

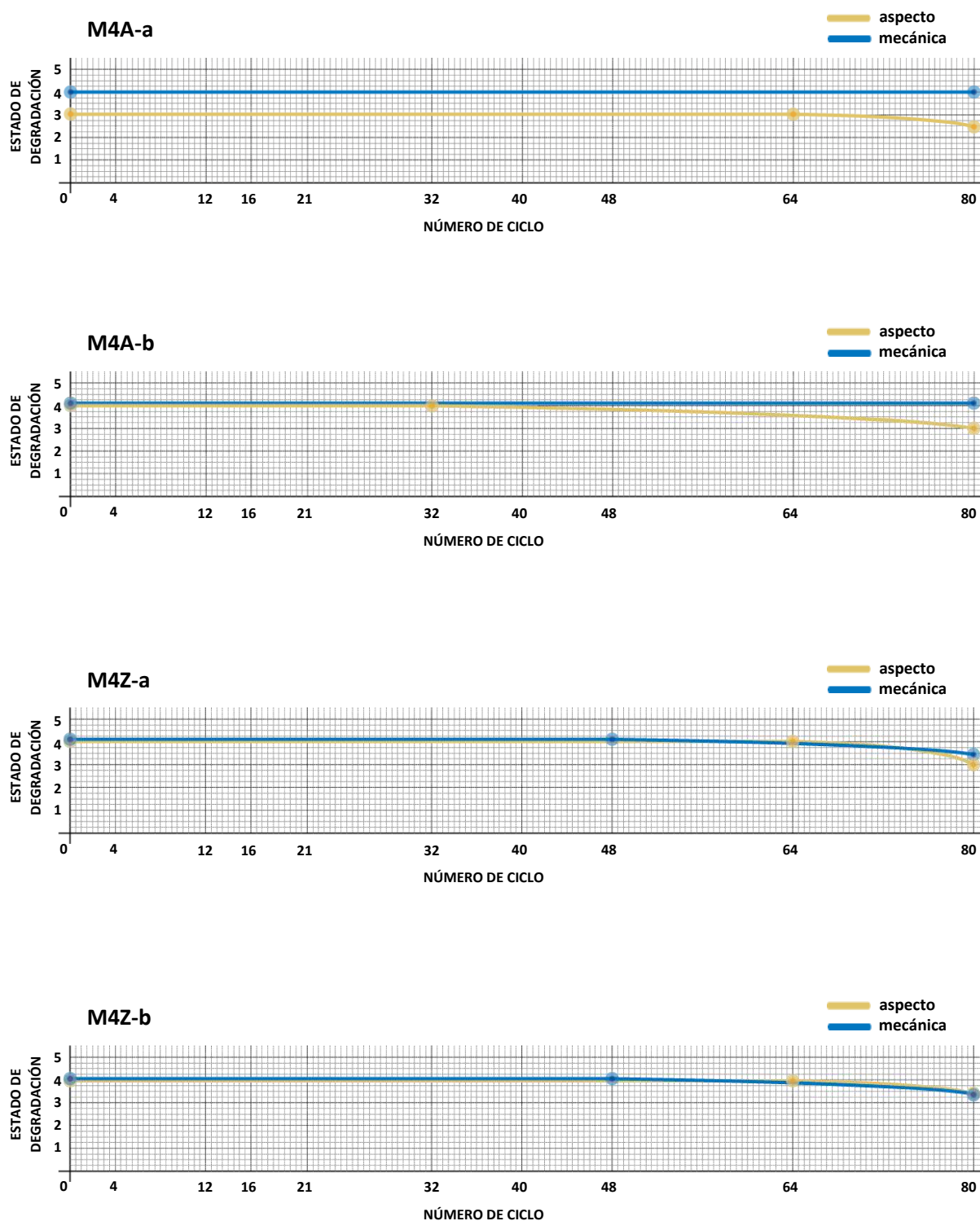


Figura 1.29 Gráficos de la evolución de las muestras sometidas a los ensayos de laboratorio

b. Mojado-Secado (MS)

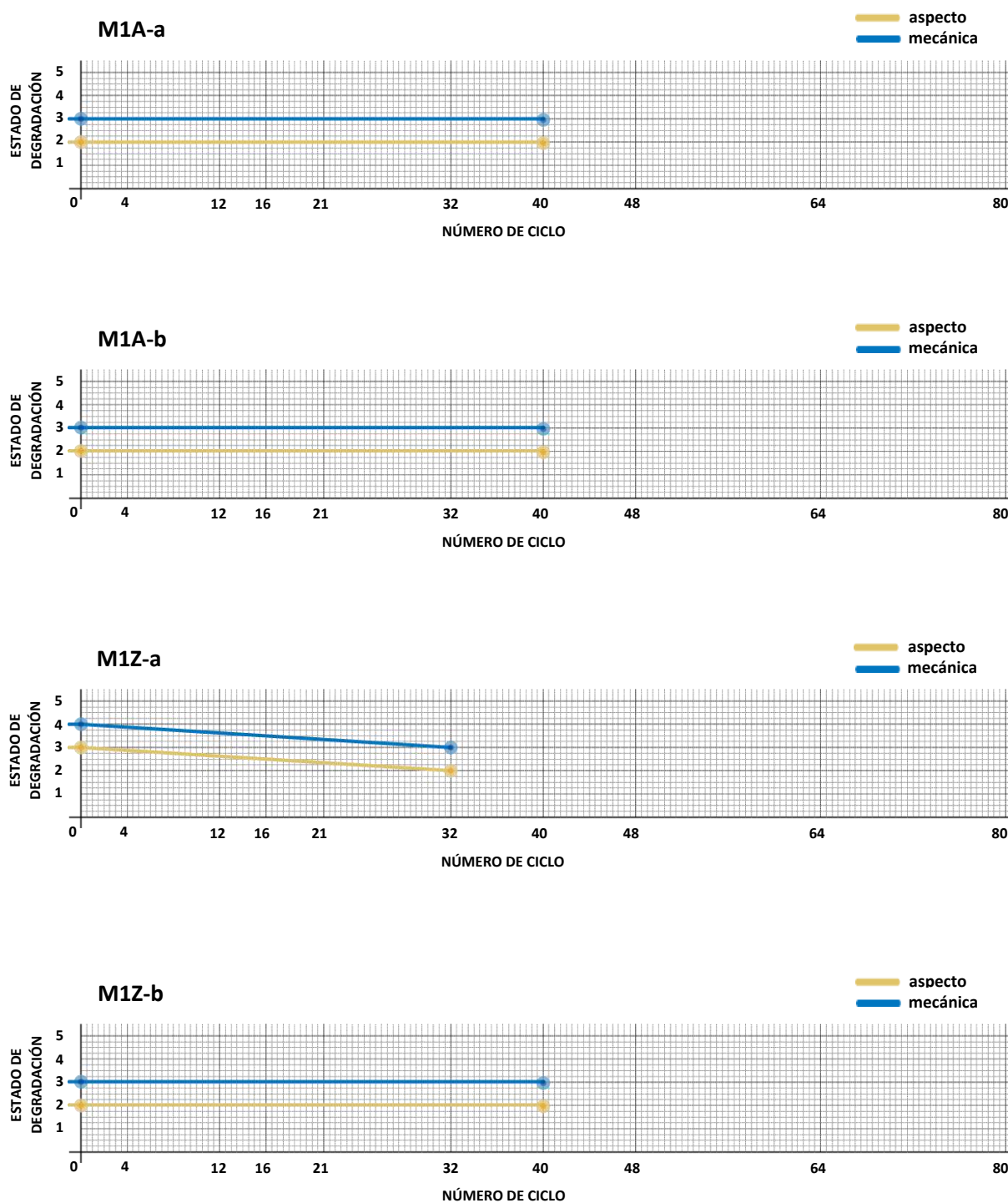


Figura 1.30 Gráficos de la evolución de las muestras sometidas a los ensayos de laboratorio

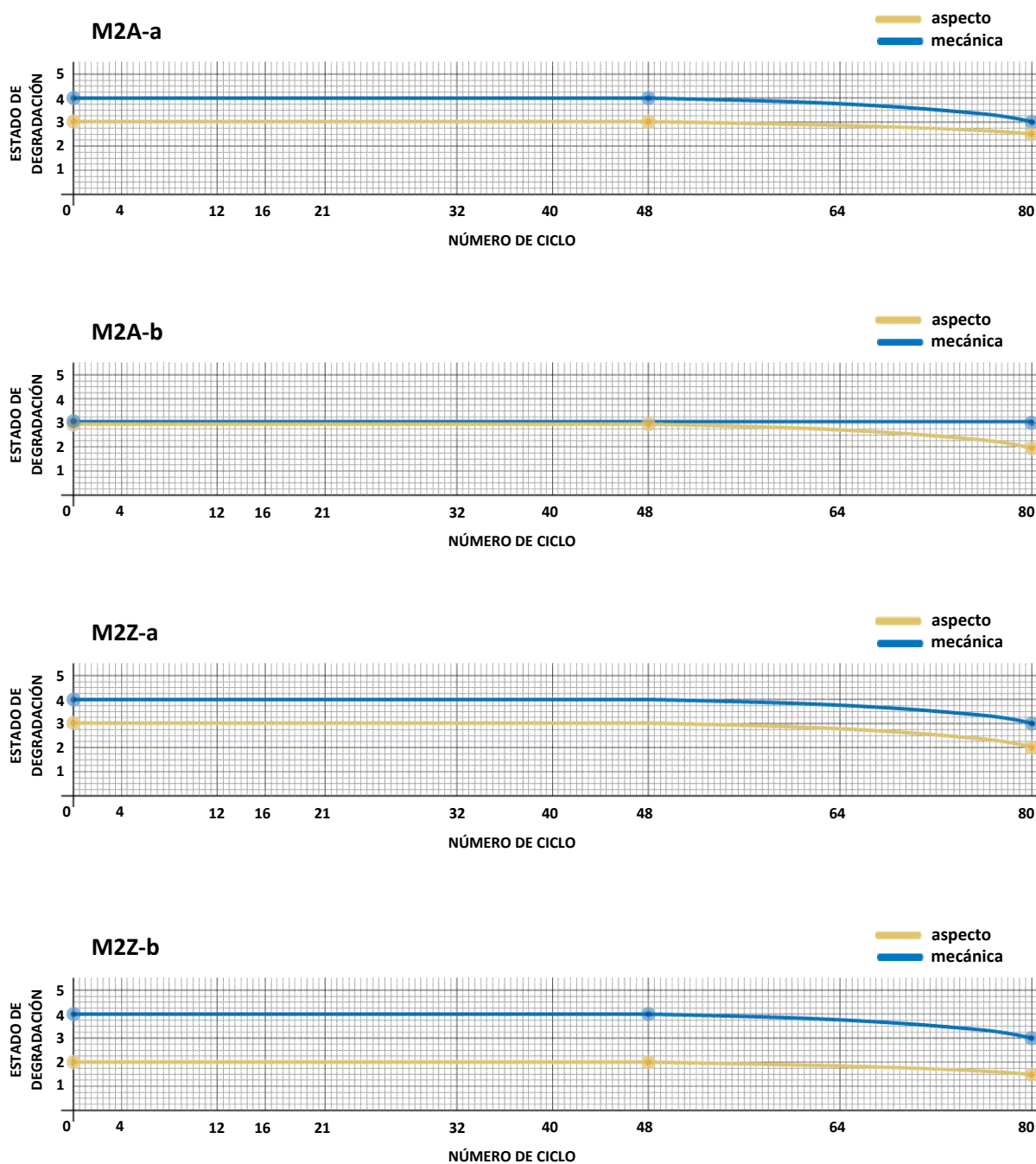


Figura 1.31 Gráficos de la evolución de las muestras sometidas a los ensayos de laboratorio

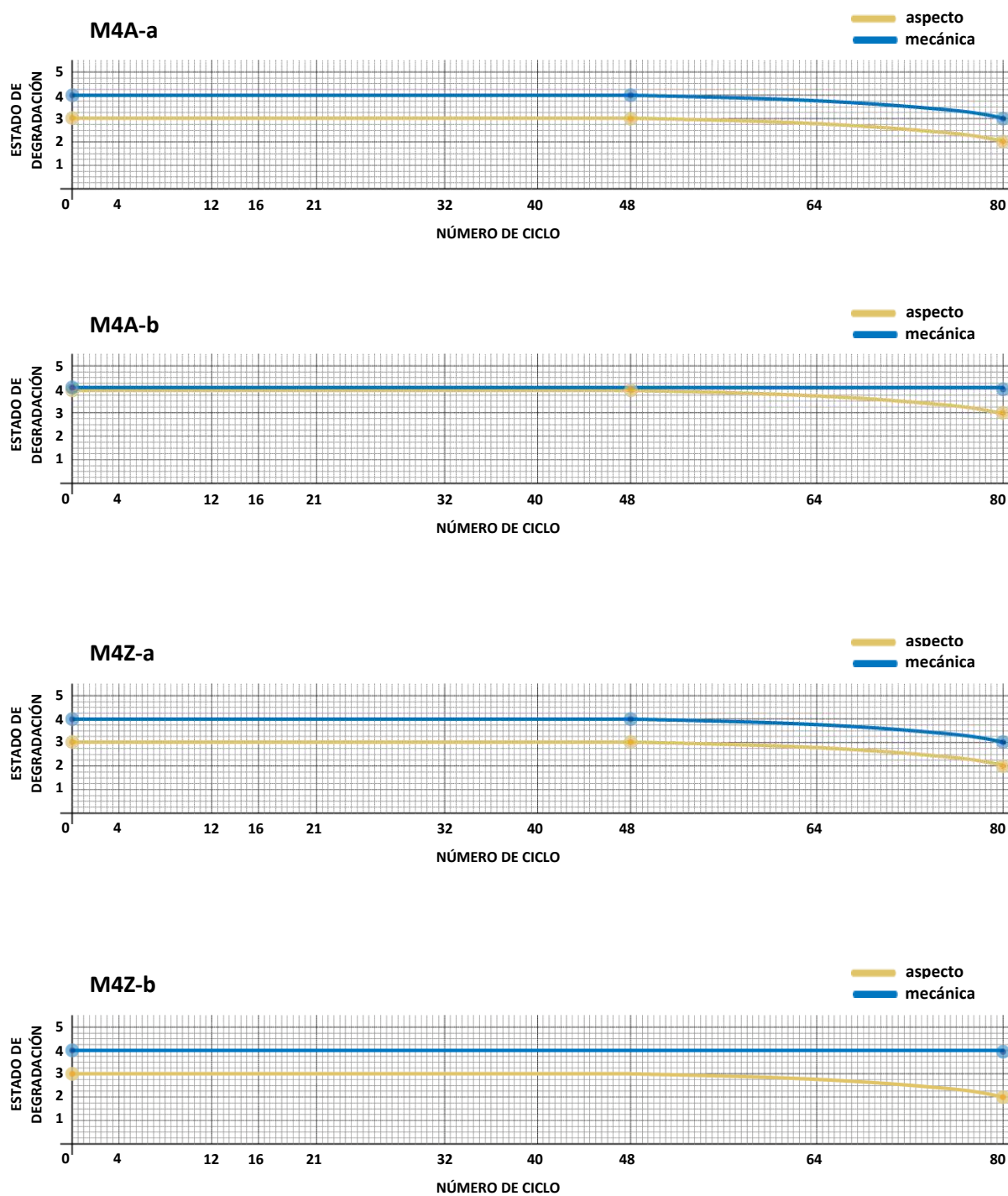


Figura 1.32 Gráficos de la evolución de las muestras sometidas a los ensayos de laboratorio

c. Hielo-Deshielo (GD)

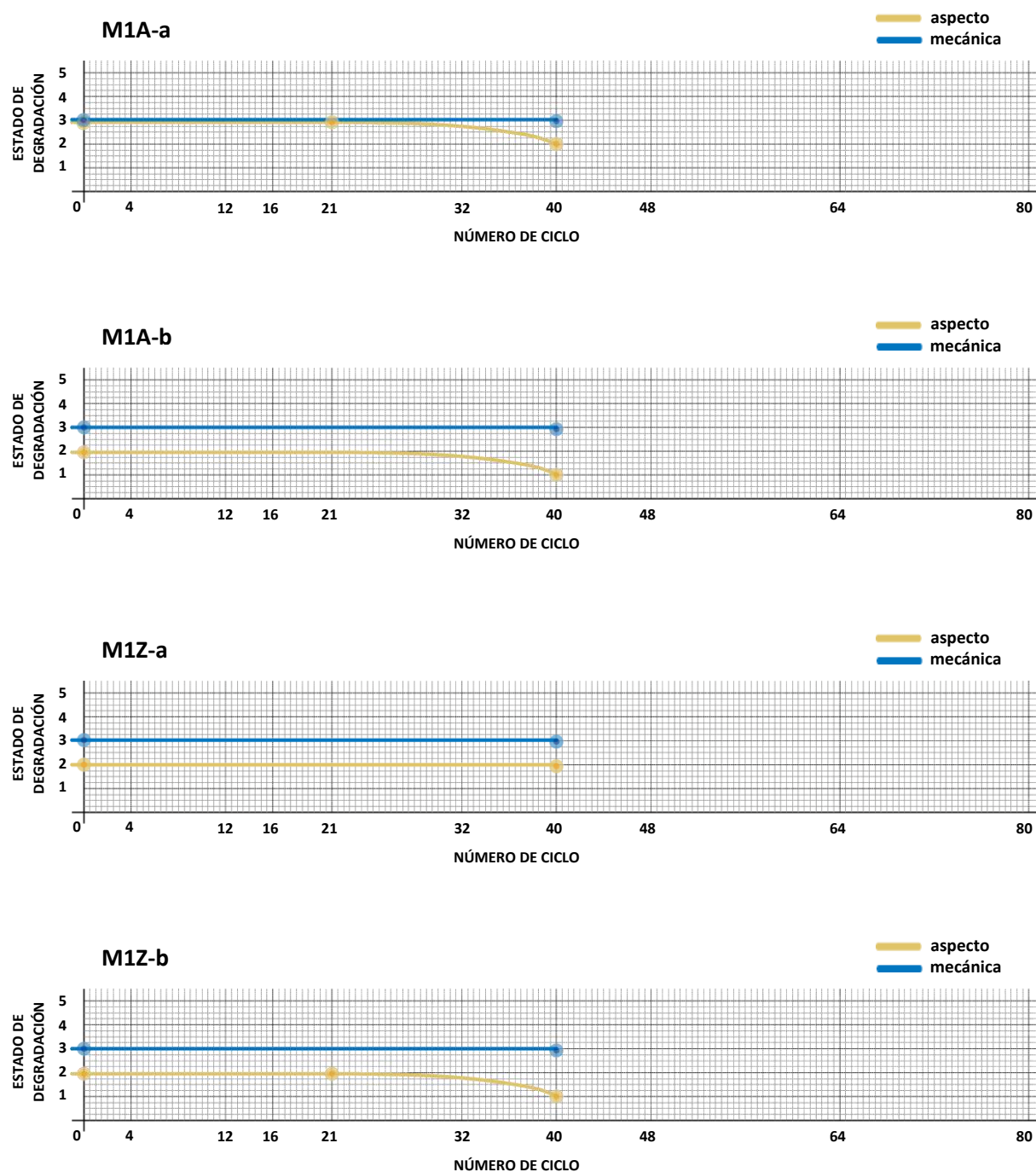


Figura 1.33 Gráficos de la evolución de las muestras sometidas a los ensayos de laboratorio

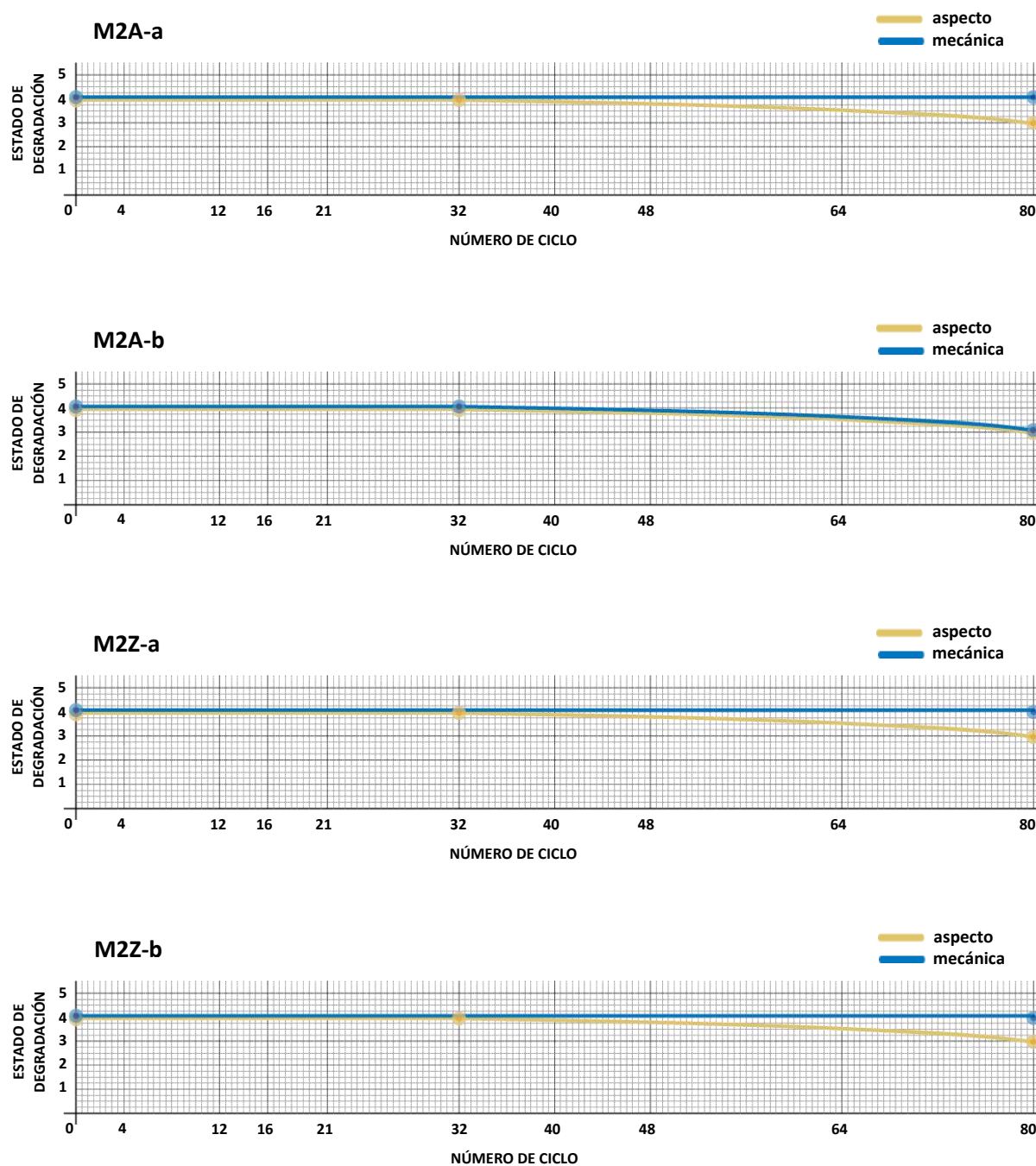


Figura 1.34 Gráficos de la evolución de las muestras sometidas a los ensayos de laboratorio

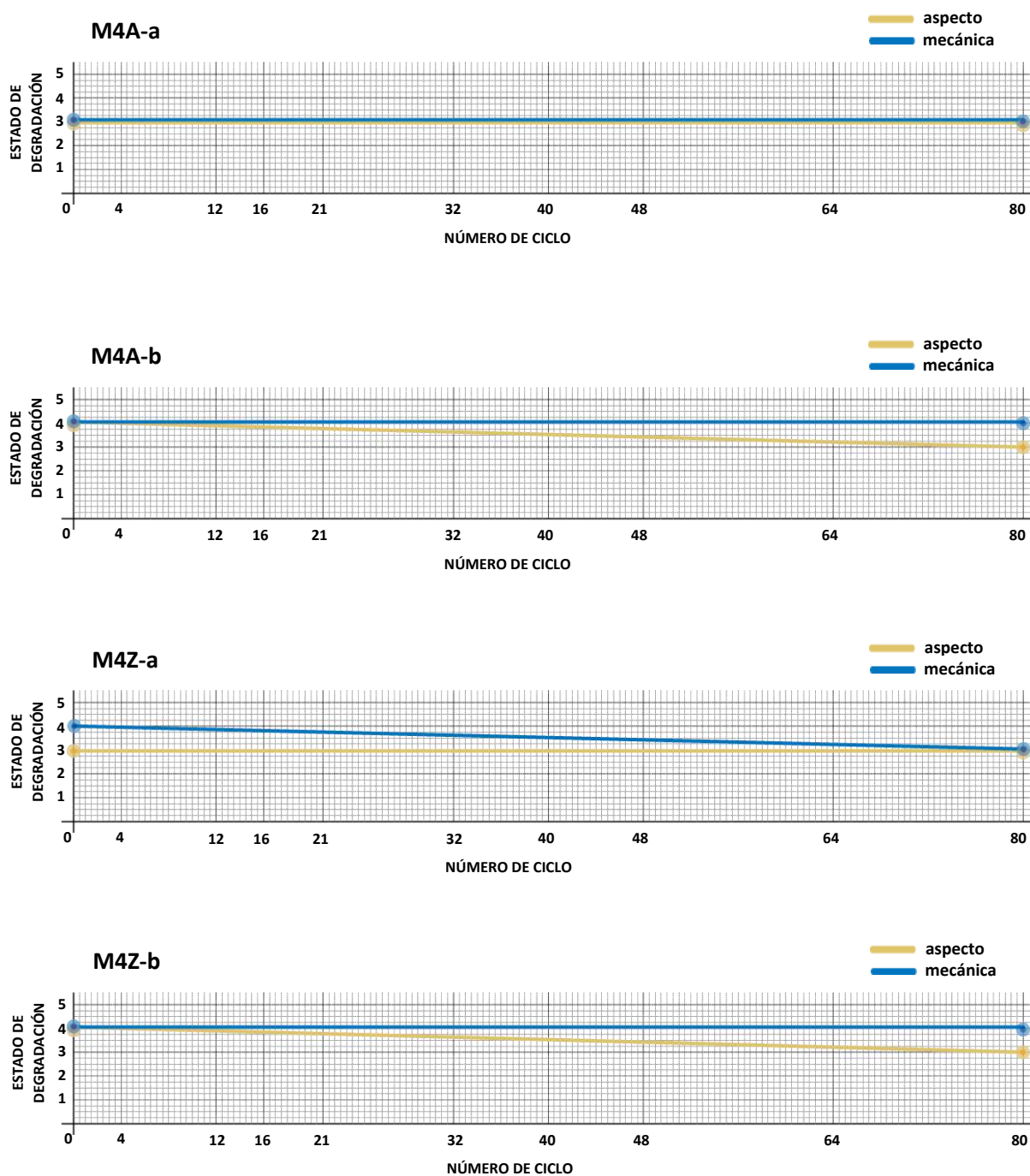


Figura 1.35 Gráficos de la evolución de las muestras sometidas a los ensayos de laboratorio

d. Cristalización de Sales

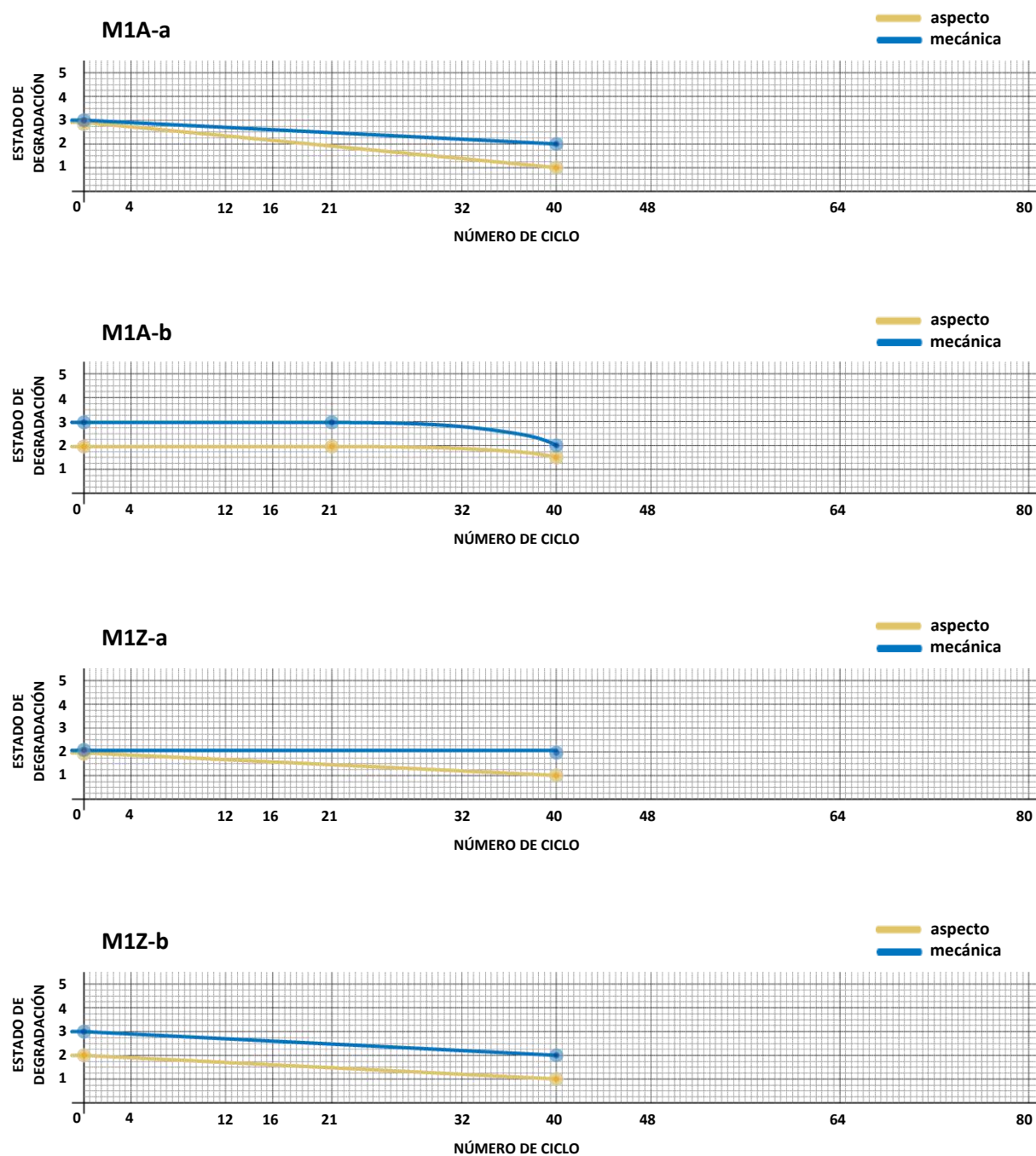


Figura 1.36 Gráficos de la evolución de las muestras sometidas a los ensayos de laboratorio

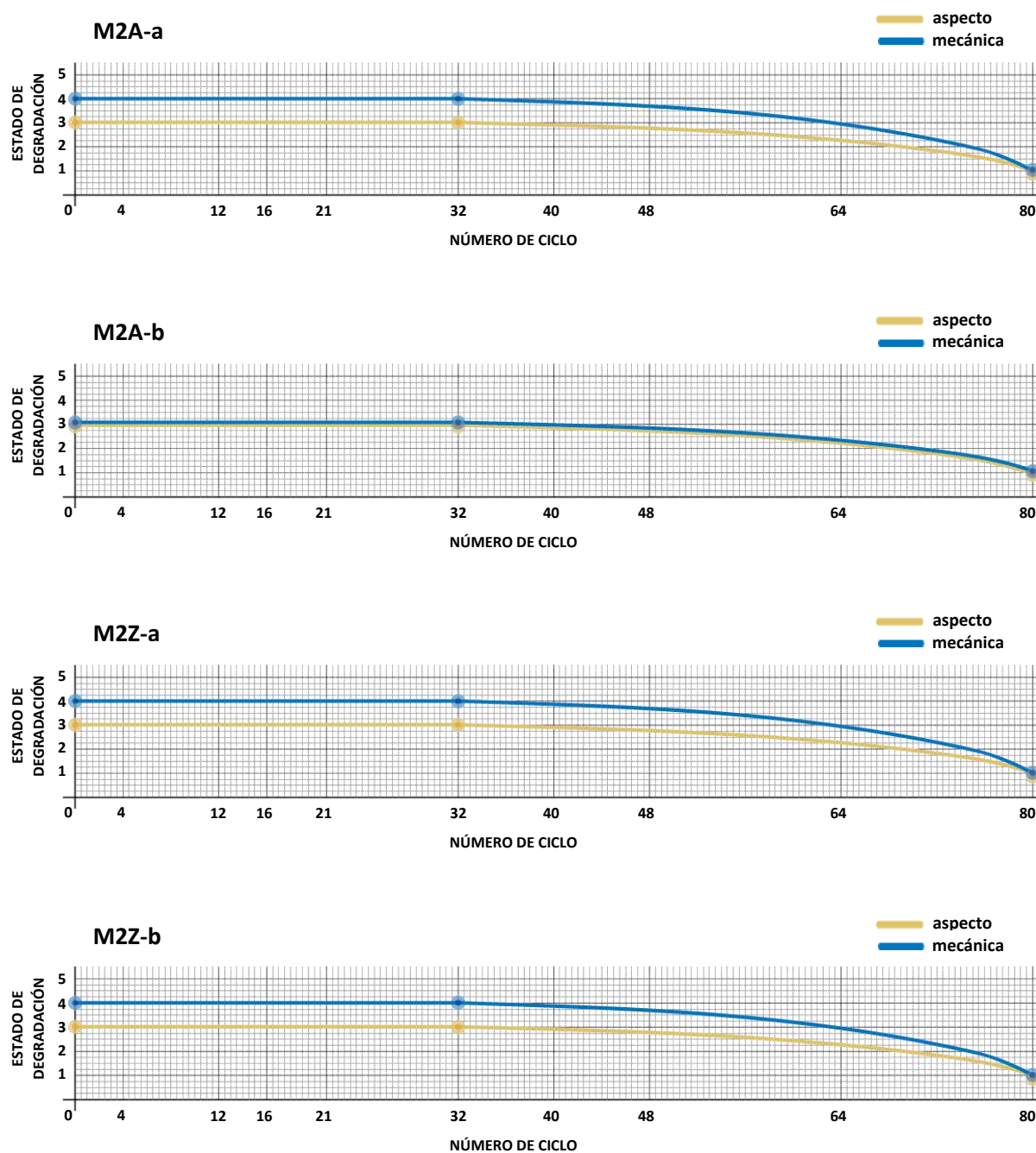


Figura 1.37 Gráficos de la evolución de las muestras sometidas a los ensayos de laboratorio

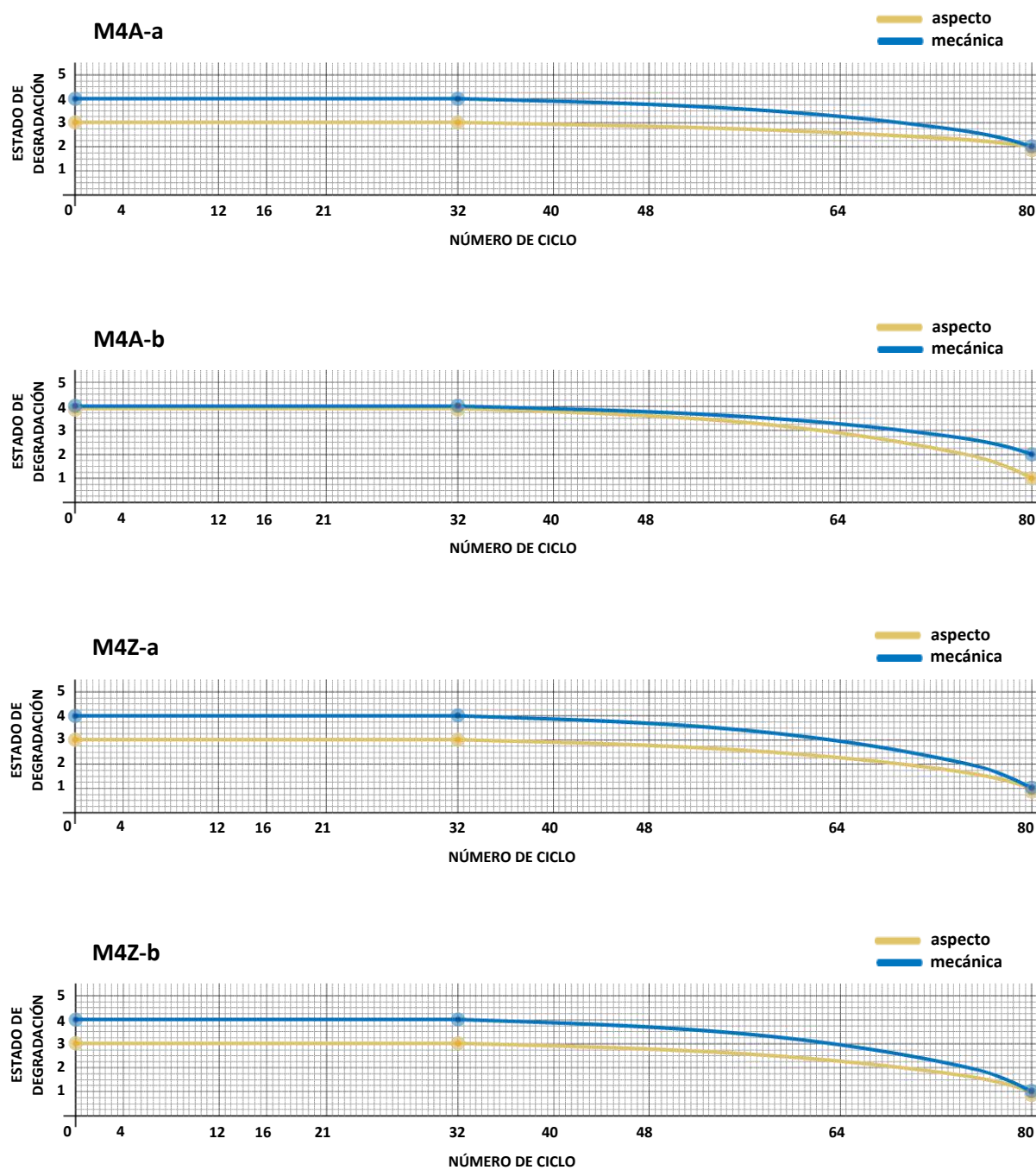


Figura 1.38 Gráficos de la evolución de las muestras sometidas a los ensayos de laboratorio

6.2.2.3. Recopilación de los patrones de anomalías manifestados en las probetas sometidas a ensayos en laboratorio bajo el análisis de microscopio óptico digital

El análisis de las probetas bajo microscopio óptico digital, después de concluidos los 80 ciclos, permite identificar con más exactitud la estructura y la posición de las diferentes anomalías dentro de las teselas de *trencadís* de vidrio metálico dorado.

Al hacer las diferentes ampliaciones con el microscopio, es posible determinar la ubicación dentro del conjunto. Es decir, permite conocer si se trata de una anomalía existente entre alguna de las capas, en la lámina de pan de oro o en las capas superficiales de los vidrios protectores. La ampliación realizada a 19X localiza las anomalías existentes entre las capas y en la lámina de pan de oro. Por otro lado, la ampliación de 160X permite enfocar y analizar las anomalías presentes en las capas superficiales de los vidrios de protección.

a. Anomalías entre capas o en la lámina de pan de oro:

- BURBUJAS
- FISURAS
- MANCHAS
- RASGADURAS
- ARRUGAS
- PÉRDIDA DE MATERIAL

b. Anomalías en las capas superficiales de los vidrios de protección:

- RESTOS DE MATERIA
- RAYONES
- RASPADURAS
- PÉRDIDA DE BORDES Y ESQUINAS
- DECAPADO
- FRACTURAS
- DESPRENDIMIENTO PARCIAL

La recopilación de las diferentes anomalías existentes en las teselas de *trencadís* de vidrio metálico dorado en las probetas sometidas a ensayos de laboratorio se puede consultar en el grupo de fichas FAL (fichas de anomalías provenientes de los ensayos de laboratorio). Las fichas contienen las anomalías existentes en los tres tipos de vidrio que se han utilizado para los ensayos de laboratorio: Ariplak, ORSONI y VIDALGLASS. No se ha tenido en cuenta la diferenciación entre VIDALGLASS Y VIDALGLASS + ENDUROSHIELD, ya que no se aprecian diferencias relevantes.

Para la lectura de las fichas hay que tener en cuenta que el análisis se ha realizado sobre las teselas de vidrio metálico dorado que permanecieron adheridas al mortero de la probeta. Por tanto, anomalías como el desprendimiento total no se han valorado.

La frase “NO REGISTRA” significa que la anomalía no se ha encontrado mediante el análisis del microscopio óptico digital en ese tipo de vidrio.

La frase “NO VISIBLE” se refiere a que la anomalía existe, pero no se observa muy claramente, ya que puede estar cubierta por otra anomalía en su superficie o que hace parte de otra.

6.3. Análisis desde la obra

Obra de Referencia: **Basílica de la Sagrada Familia (SF)**

Localización: **Ensanche, Barcelona**

Fachada a analizar: **Fachada de la Natividad**

Orientación: **Levante (nordeste)**

Antigüedad: **>100 años**

Elemento a analizar: **Trencadís de vidrio metálico dorado**

Ubicación de los elementos: **Pináculos (remate torres campanario)**

Altura de referencia: **entre los 98 y los 117 m**

Detalle y lectura de los pináculos:

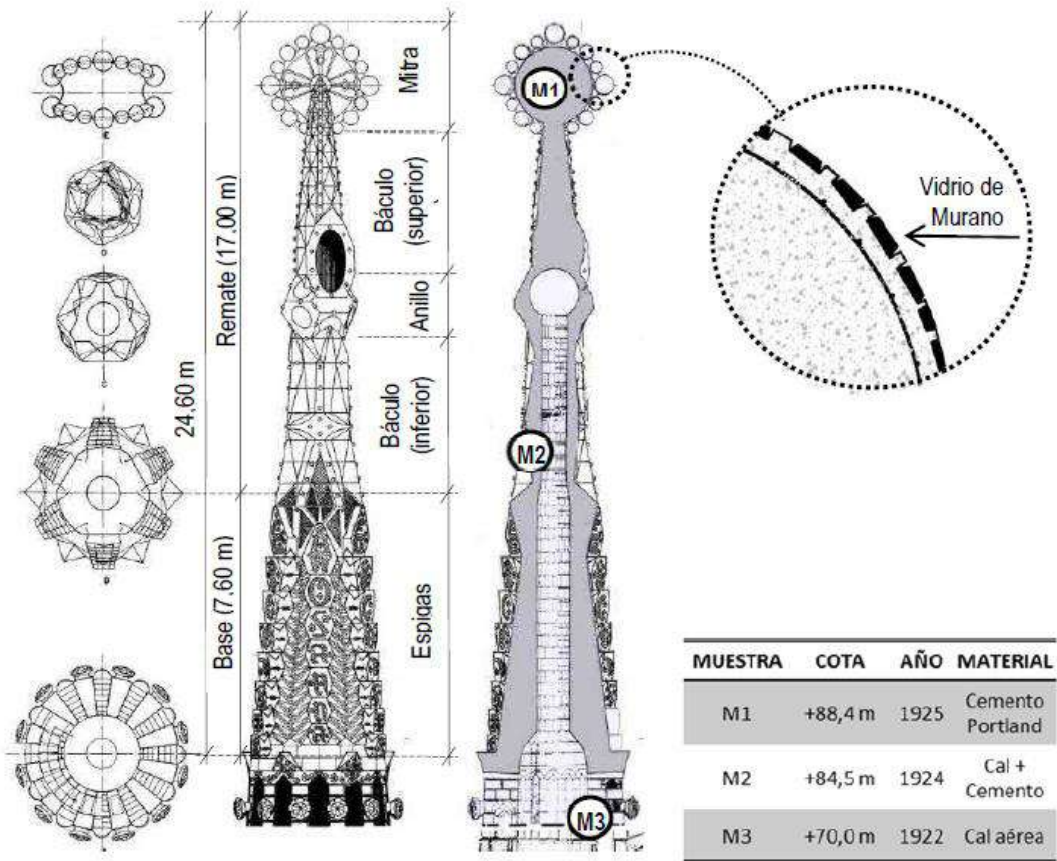


Figura 1.1 Forma y distribución del pináculo de San Bernabé y morteros utilizados

6.3.1. Patrones de colocación

Hacer un análisis sobre los patrones de colocación del revestimiento de *trencadís* con teselas de vidrio metálico dorado permite entender mejor la afectación de este revestimiento derivada de la exposición a los fenómenos ambientales en condiciones reales en un tiempo prolongado.

La observación de los diferentes patrones de colocación ayuda a entender la aparición de anomalías desarrolladas en el periodo de servicio del revestimiento de *trencadís*. Este entendimiento permitirá a futuro saber la manera más correcta de actuación de acuerdo a la disposición en que se encuentran expuestas las teselas de *trencadís*. En este capítulo se incluyen dos condiciones nuevas con respecto a los usos precedentes de este tipo revestimiento principalmente usado en los mosaicos bizantinos en el interior de construcciones religiosas. Se aplica con la técnica del *trencadís* sobre superficies con diversas geometrías y los materiales se exponen al exterior recibiendo ataques directos de los fenómenos naturales en tiempo real.

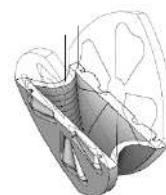
La durabilidad del vidrio metálico dorado depende de diferentes factores. Dentro de ellos, uno de los más importantes es el nivel de exposición o protección a la intemperie. Sin embargo, hay que tener en claro que el nivel de exposición o protección puede ser un factor positivo o negativo dependiendo de las condiciones atmosféricas a las cuales está expuesto el revestimiento.

La fachada de la Natividad, de la obra de la Sagrada Familia de Gaudí, está orientada al noreste. Gracias a la amplitud de las vías resultantes de la disposición de las manzanas del ensanche proyectadas en el Plan Cerdá, esta fachada recibe el sol a lo largo de toda la mañana. Sin embargo, los pináculos son el punto más alto de la basílica, lo que les hace tener una exposición mayor frente a los fenómenos ambientales. Al ser elementos que se encuentran por encima de la altura de los edificios del perfil urbano, reciben directamente todas las corrientes de aire, las descargas de lluvia, los rayos del sol directos, etc., sin tener ninguna barrera que atenúe el efecto de estas acciones. Dentro del conjunto de los pináculos, no todos los elementos de *trencadís* reciben la misma cantidad de incidencias ambientales (sol, viento, lluvia), ya que su característica geométrica de yuxtaposición de objetos, la altura, orientación y disposición, hacen que cada sector de *trencadís* tenga condiciones especiales. Es por esta razón que resulta conveniente realizar un análisis de patrones de colocación para agrupar las características en función de la geometría que les sirve de base.

Para el desarrollo de este análisis se tomará como referente el pináculo de San Bernabé, ya que se trata del más antiguo dentro del grupo de pináculos de la fachada de la Natividad.

6.3.1.1. El Pináculo de San Bernabé

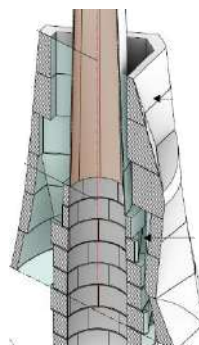
La cruz o mitra del remate del pináculo está conformada por una estructura prefabricada sujeta a una base de ladrillos macizos.



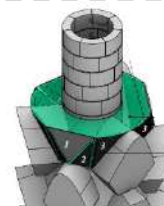
El anillo se trata de un poliedro, prefabricado de hormigón, formado por dos cubos rotados entre sí.



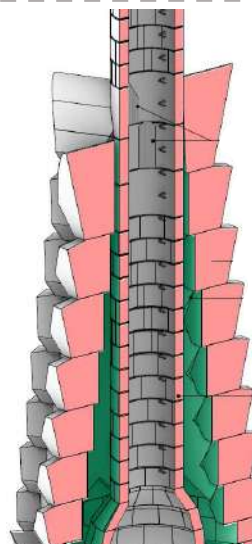
La estructura de los báculos se forma a partir de un encofrado de láminas de madera dispuestas verticalmente sobre las que se apoyan piedras de Montjuïc horizontalmente. Como revestimiento exterior se colocan piezas prefabricadas de hormigón, realizadas a pie de obra, y en el espacio resultante entre los paramentos se rellena con hormigón.



La unión entre la estructura exterior del báculo y las espigas se realiza con piezas triangulares de basalto y hormigón para el agarre.



La estructura interior y las piezas de las espigas son de piedra maciza tallada con un relleno de hormigón entre las dos. Ya que la forma de la estructura es un cono, las piezas más altas de las espigas, al ser del mismo tamaño que las demás, entran en la estructura interior y reemplazan las piedras interiores.



La corona es la zona desde donde arranca el pináculo justo al terminar el último piso accesible de la torre. Se trata de una estructura compleja con base en una pirámide, cuyas aristas inician el desarrollo del pináculo.

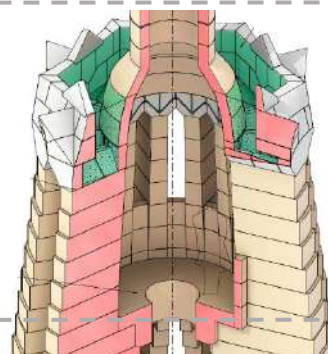


Figura 1.2 Estructura del pináculo de San Bernabé

Localización de los patrones de colocación



Orientación: noreste

Orientación: noroeste

Orientación: suroeste

Orientación: sureste

Figura 1.3 Patrones de colocación del vidrio dorado en el pináculo de San Bernabé



localización

LEYENDA	
Forma de la base de los Patrones de colocación	<div></div> ondulado
	<div></div> plano
	<div></div> convexo
	<div></div> cóncavo



Figura 1.4 Distribución por zonas de los patrones de colocación

Una primera identificación de los diferentes patrones de colocación en el pináculo de San Bernabé hace denotar que no se disponen de una manera aleatoria, sino que cada patrón ocupa una zona específica que responde a factores estéticos, pero también mecánicos, factores siempre presentes de forma conjunta en la obra de Gaudí. Los patrones de forma ondulada se encuentran en el coronamiento del pináculo y se colocan sobre un plano vertical. Los patrones de forma convexa redonda siempre se encuentran sobre planos inclinados superiores o inferiores. Mientras, en la zona del anillo se ubican teselas de *trencadís* de vidrio metálico dorado sobre formas convexas con aristas, pero sobre plano un vertical. Las formas cóncavas con aristas talladas en la piedra se encuentran sobre un plano vertical, principalmente, o, en algunas ocasiones, sobre un plano inclinado superior. No es posible encontrar este patrón sobre un plano inclinado inferior, ya que, probablemente, se generaría la acumulación de agua y de partículas.

Cabe aclarar que la variación en la utilización de aglomerantes para los morteros y hormigones se debe a que a medida que se iba construyendo el pináculo, se iba utilizando la tecnología y los materiales de aquel momento.

Hay que resaltar que el pináculo de San Bernabé fue la única torre que Gaudí vio acabar en vida, por lo que se puede afirmar que los patrones de colocación que se encuentran en este pináculo, son la base para el desarrollo de las demás torres y, además, configuran la idea original del arquitecto.

6.3.1.2. Taxonomía de clasificación para la valoración de los patrones de colocación

La identificación de patrones de colocación y de sus características permite interpretar, en cierta forma, la aparición de anomalías propias de un estado de servicio, pero, además, aporta una lectura adecuada sobre la utilización del revestimiento de *trencadís* con teselas de vidrio metálico dorado en exterior en el modernismo catalán con el fin de realizar intervenciones a futuro.

Como se ha visto en los diferentes capítulos precedentes, las anomalías surgen en los diferentes momentos del proceso de la utilización del vidrio metálico dorado en un revestimiento exterior de *trencadís*. De acuerdo con el momento en el que surgen, se pueden clasificar en: anomalías primarias⁷⁵, que son defectos del material provenientes de fábrica, anomalías por montaje⁷⁶, que aparecen debido a factores de colocación o manipulación, y anomalías por servicio. Este último tipo depende, principalmente, de la exposición de las teselas de *trencadís* por un tiempo prolongado a factores ambientales reales. Este tipo de anomalías son las que se tratarán a lo largo de este capítulo.

La implementación de una taxonomía es la metodología que se utiliza para el desarrollo de este capítulo. Realizar una taxonomía permite reconocer de forma estructurada los diversos patrones de colocación, ya que ayuda, de una manera organizada y sistemática, a realizar una clasificación de acuerdo con las características y comportamientos de cada elemento con el fin de obtener factores base con los cuales realizar una correcta interpretación. Este método aporta tres aspectos principales: el primero, la interpretación de los puntos básicos que componen al elemento. En otras palabras, las características principales. El segundo, la identificación de los factores externos que afectan a los elementos, y, por último, la rapidez para poder interpretar e identificar los elementos analizados.

Factores de Clasificación:

Al realizar un análisis sobre cualquier objeto, existen infinidad de características que se pueden tener en consideración para su clasificación, pero la taxonomía debe apoyarse sobre los aspectos que son clave del objeto analizado, pero también de su entorno, ya que éste modifica y determina el comportamiento del objeto. Dentro de los elementos base a tener en cuenta para el análisis de la clasificación taxonómica se proponen:

1. La orientación geográfica del revestimiento (norte, sur, este, oeste + sub-orientaciones)
2. La forma del patrón de colocación de la base de las teselas de *trencadís* (plano, cóncavo o convexo, mixto)
3. La forma de montaje (prefabricado de vaciado en molde, piedra tallada con mortero de fijación, piedra tallada con mortero de recrecido)
4. La Posición (vertical, horizontal, inclinado superior, inclinado inferior)
5. El método de colocación de las teselas de *trencadís* (inmerso en mortero, mortero vaciado) – factor secundario (implícito en el factor 3)
6. El nivel de exposición (expuesto, protegido) – factor secundario (implícito en todos los demás factores)

⁷⁵ Las anomalías primarias se encuentran descritas en el capítulo 4.1

⁷⁶ Las anomalías por montaje se encuentran descritas en el capítulo 4.2

Estos seis parámetros son indispensables para la correcta lectura del comportamiento del revestimiento de las teselas de *trencadís* de vidrio metálico dorado cuando se encuentran en una situación de servicio.

Descripción de los elementos de clasificación

1. **Orientación:** El factor principal que afecta a los revestimientos cuando se encuentran expuestos a la acción de fenómenos ambientales es la orientación. La intensidad con que una acción afecta a un objeto expuesto al exterior depende del ángulo de incidencia del viento, de la lluvia, de la brisa del mar, del sol, etc., y, todos estos condicionantes dependen de la orientación geográfica, (especialmente en una ciudad costera mediterránea), con la influencia de la superficie salina alta en sales y rodeada de montañas como lo es Barcelona. Existen las cuatro opciones de los puntos cardinales (norte, sur, este y oeste) y sus combinaciones.

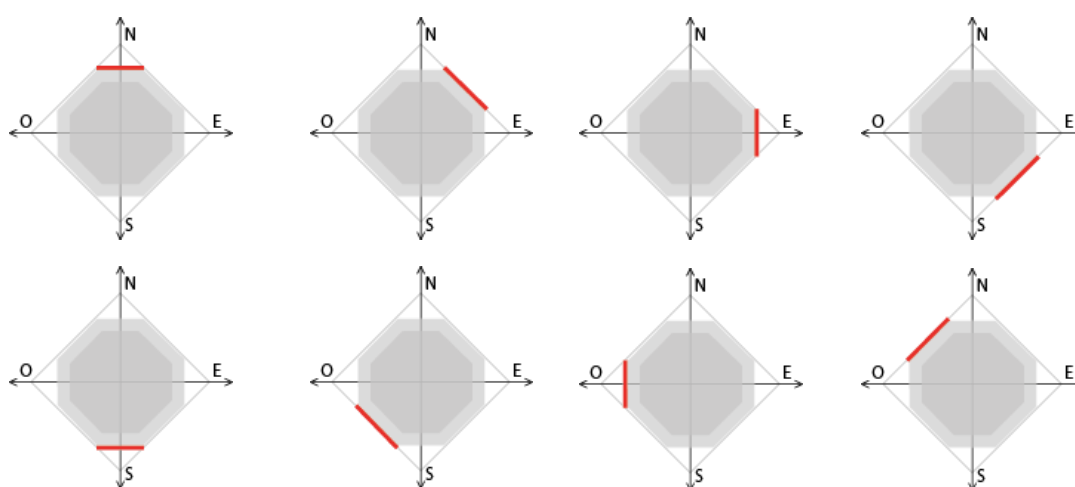


Figura 1.1 Orientaciones y sub-orientaciones

2. **Forma de la base del patrón de colocación:** La forma de la base o soporte del revestimiento es el segundo elemento calificador, ya que de esto depende el nivel de exposición o protección de las teselas de *trencadís*, especialmente con respecto a las sombras propias y a la escorrentía del agua. Hay formas que generan una mayor fluidez en sentido vertical, como los planos, y otras que, en cambio, generan puntos de estancamiento de agua o partículas, como las formas cóncavas. Otras formas como las convexas, se podría decir que son un punto intermedio, donde en algunas zonas existe una buena fluidez y en otras se genera estanqueidad. Todo el comportamiento de los fluidos y demás factores dependen de la gravedad y de la forma de la base sobre la cual se están desplazando.

Aunque las formas básicas de los patrones de colocación ya se han mencionado anteriormente, existen también algunas variaciones que de igual forma tienen comportamientos diferentes frente a las acciones que influyen en la durabilidad del material. Dentro de estas variaciones se encuentran las formas cóncava y convexa redonda y con aristas⁷⁷. Es importante denotar esta variación, ya que, al poseer aristas, el comportamiento de los agentes que actúan sobre las teselas de *trencadís* es diferente.

⁷⁷ La forma cóncava o convexa con aristas en ocasiones se denomina como “estrella”

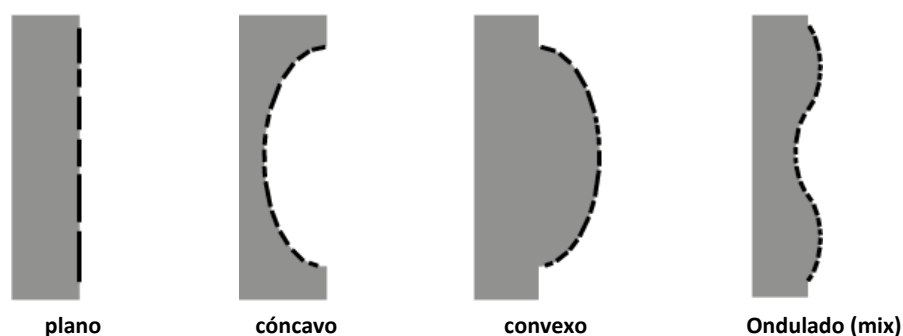


Figura 1.2. Forma de la base de los patrones de colocación de las teselas de *trencadís*

3. **Proceso de montaje:** Es un factor determinante para definir la durabilidad del vidrio metálico dorado, ya que la acción y la reacción de diferentes materiales usados para la colocación pueden generar diferentes reacciones químicas o físicas. Dentro de los procesos de montaje se diferencian dos opciones: puede ser un montaje prefabricado con mortero vaciado o puede tratarse de una forma tallada en piedra. En la primera situación, el tratamiento de las superficies de contacto de la cara externa con el molde es muy importante para determinar la durabilidad. Cuando son tallados en piedra, el factor principal que determina la durabilidad del material de acuerdo a la forma de montaje dependerá de la técnica del picapedrero⁷⁸.

LEYENDA PARA LA LECTURA DE LOS GRÁFICOS

B1 - MOLDE
B2- CONTRAMOLDE
M - MORTERO
P - PIEDRA

A. Prefabricado de vaciado en molde

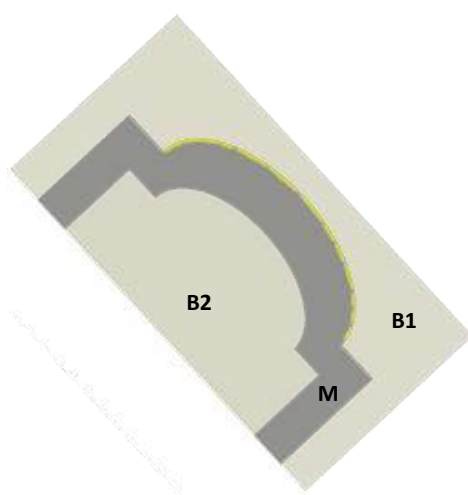


Figura 1.3

Debido a las formas complejas y a los tiempos del proceso, las diferentes secciones de los pináculos de la SF fueron mayoritariamente realizados a partir de elementos prefabricados en donde, la gran mayoría (sean planos, cóncavos o convexos), se fabrican mediante la disposición de las teselas de *trencadís* de vidrio metálico dorado sobre un molde haciendo un vaciado de mortero, sea éste de cal aérea, cemento + cal o cemento portland

⁷⁸ Existe otra posibilidad, en las formas se crean con el mortero y, aun fresco, sobre la base, se colocan las piezas de *trencadís* y se presionan con el dedo una a una. Sin embargo, esta técnica solo se utilizó en formas planas y quedó descartada en las demás formas como posible solución en la torre San Bernabé, de acuerdo a conversaciones con la Dra. Gómez Ramió, experta en morteros

B. Piedra tallada con mortero de fijación

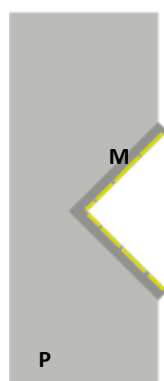


Figura 1.4

Las zonas bajas del pináculo, aquellas que corresponden a las espigas, a la corona, a la imposta y a las pilastras de base, son realizadas con piedra arenisca, la cual es tallada para crear las diferentes formas. Posterior a esto, se realiza la adherencia directa de las teselas de vidrio metálico dorado con mortero.

C. Piedra tallada con mortero de recrecido

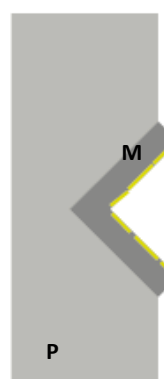
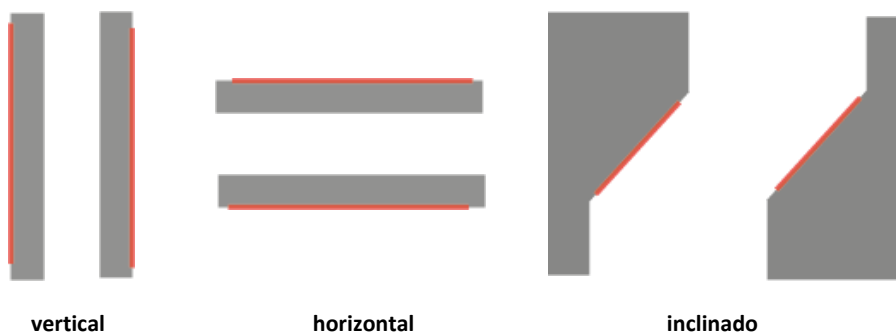


Figura 1.5

En algunas de las formas talladas en la piedra, debido a la dificultad y al cuidado del picapedrero, el mortero, además de servir como elemento de adhesión de las teselas de vidrio metálico dorado, sirve para dar forma, por lo que tiene un mayor espesor y el acabado puede ser de menor calidad debido a la elasticidad del mortero y al control adicional necesario para nivelar las teselas.

4. **Posición:** La posición es un calificador principal, ya que aumenta o disminuye la intensidad de las diferentes acciones ambientales que actúan sobre las teselas de *trencadís*. La gravedad es un fenómeno que afecta a las teselas tanto en su forma de adhesión como en la interacción de los fenómenos, especialmente en la escorrentía del agua. Esta deberá tenerse en cuenta para reducir los factores de riesgo en la durabilidad del material. Las posiciones de elementos que se contraponen como horizontal/vertical, aunque tiene la misma forma de colocación (plano), actúan completamente diferente. De igual forma, la posición sobre planos inclinados superiores o inferiores, genera diferentes comportamientos.


Figura 1.6 opciones de posición del revestimiento de *trencadís*

5. **Métodos de colocación de las teselas de *trencadís*:** Es un calificador secundario, ya que se hace parte de la forma de montaje. Existen dos métodos posibles de colocación de las teselas de *trencadís* en el mortero. El primero: inmerso⁷⁹, el mortero sirve como base por lo cual las teselas son colocadas y empujadas generando una acción en donde el mortero rebosa haciendo que el conjunto de *trencadís* pierda uniformidad en cuanto a lo liso. Esto puede tener relevancia dependiendo de los factores que influyen sobre las teselas de *trencadís*. En el segundo: vaciado⁸⁰, las teselas de *trencadís* sirven como base y el mortero se vacía encima ayudado por un molde y contra molde para realizar las formas requeridas. Este proceso crea una superficie más uniforme, lo que genera una exposición mayor a la intemperie de los bordes de teselas de *trencadís*. Esta situación puede ser positiva en algunas ocasiones, ya que permite la aireación, pero negativa en otras, pues permite la entrada de agua y, consiguiente, el aumento de reacciones. Todo dependerá de la técnica que se use para la protección de las teselas a la hora de vaciar el mortero.

En algunas ocasiones, según la Dra. Gomez Ramió, el mortero de las juntas queda recrecido debido al momento de retirar el elemento de protección que se coloca en el molde para evitar que se peguen las teselas de *trencadís*.

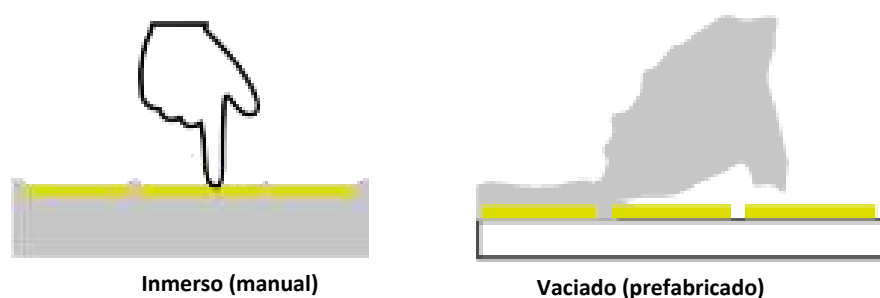


Figura 1.7 método de colocación de las teselas de *trencadís*

6. **Nivel de exposición:** Es un factor secundario, ya que se encuentra implícito en las demás determinantes de clasificación. Existen formas, posiciones, orientaciones, etc., que generan mayor exposición o, por el contrario, protección. Los dos determinantes pueden dar resultados tanto positivos como negativos dependiendo de los diversos factores que afectan al conjunto.



Figura 1.8 Nivel de exposición de las teselas de *trencadís*

⁷⁹ En otros apartados de la investigación se ha denominado como método directo, manual o positivo. Son sinónimos para referirse a este método

⁸⁰ En otros apartados de la investigación, se ha denominado como método indirecto, prefabricado o negativo. Son sinónimos para referirse al mismo método

6.3.1.3. Anomalías en las teselas de vidrio metálico dorado del revestimiento de *trencadís* con más de 100 años de servicio

La utilización del vidrio metálico dorado como revestimiento exterior en la arquitectura modernista catalana nos remonta a hacer un análisis de las anomalías que se presentan sobre elementos que han sido expuestos a fenómenos ambientales en un periodo de más de 100 años. A este tipo de anomalías que se originan en un periodo determinado y real se denominan “anomalías por servicio”.

La importancia de identificar este tipo de anomalías reside en que son una guía para poder entender el momento y la acción en que se genera cada una de ellas con el fin de poder detenerlas o evitarlas.

Hay que tener en cuenta que el vidrio metálico dorado desde su salida de fábrica hasta su colocación final va pasando por muchos procesos que generan diferentes tipos de anomalías. De acuerdo al tratamiento que se les hayan dado a las teselas de vidrio metálico dorado a la hora del montaje, las anomalías que se presentaban desde un origen pueden no evolucionar o, por el contrario, pueden aumentar su degradación o incluso dar pie a la generación de nuevas anomalías.

Dentro de las anomalías identificadas en las teselas de *trencadís* de vidrio metálico dorado expuestas a más de 100 años encontramos distintas manifestaciones que proponemos clasificar de la siguiente manera:

- A. DESPRENDIMIENTO
- B. PÉRDIDA DE MATERIAL
- C. HUMEDADES
- D. DESGASTE
- E. OSCURECIMIENTO CENTRAL
- F. OSCURECIMIENTO PERIMETRAL
- G. SUCIEDAD
- H. EXPOSICIÓN DE BORDES
- I. GRIETAS
- J. FRACTURAS
- K. MANCHAS
- L. PERFORACIONES

No todas las anomalías encontradas poseen el mismo nivel de afectación, ya que atacan capas diferentes con intensidades diferentes. Como ya se ha mencionado en capítulos precedentes, el vidrio metálico dorado, al tratarse de un vidrio compuesto, posee diferentes capas propias en donde el elemento central característico (lamina de pan de oro) se encuentra protegido por dos vidrios de diferentes espesores, cada uno con funciones determinadas. La pérdida o el ataque a cada una de estas capas determina la gravedad de la acción⁸¹.

⁸¹ Para ver en detalle las diferentes anomalías encontradas en el revestimiento de *trencadís* de la Sagrada Familia, ir a el grupo de fichas FAS

6.3.1.4. Comportamiento y características de los patrones de colocación en servicio

Los patrones de colocación son las formas con las cuales se modelan las bases para la colocación de las teselas de *trencadís*. El levantamiento para la valoración de los patrones de colocación se realiza sobre revestimientos expuestos a más de 100 años a la intemperie. Se realiza un análisis visual y comparativo para determinar las diferentes características y anomalías que se presentan en servicio, es decir, en tiempo real.

Para poder realizar un análisis comparativo, hay que recordar algunos aspectos propios de la técnica del *trencadís*. Lo primero a tener en cuenta es que se trata de una técnica en donde las teselas parecen estar en un aparente desorden y una disposición aleatoria, pero en la mayoría de los casos no es así. Normalmente, siguen una disposición en donde las líneas que forman aristas, en la mayoría de los casos y sobre todo en las estrellas, van alineadas con el lado más grande de la tesela de *trencadís* para, por un lado, acentuar y delimitar aún más la arista y el borde de la figura y, por otro, para tener mayor área a la hora de la distribución de las tensiones. En ninguno de los casos, la línea de la arista o del borde es, o debería ser, superada, ya que, en el caso de estar en diferentes planos, una parte quedaría sin hacer contacto con la base, lo que generaría anomalías futuras graves como el desprendimiento o la aparición de humedades. También se podría romper el equilibrio que se crea entre las teselas de *trencadís* y las juntas de mortero.

Otro aspecto por tener claro es que la técnica del *trencadís* se trata de un trabajo artesanal desarrollado de manera manual. Como la colocación de las teselas sigue la idea de Gaudí de que las piezas de *trencadís* deberían ser puestas “a grapats”, en los diferentes patrones existen variaciones locales en donde algunos, aparentemente, son realizados con mucho más cuidado que otros. Otra de las diferencias que se pueden señalar es que en algunas ocasiones los anchos de las juntas de mortero son menores, es decir, las teselas de *trencadís* se hallan más cercanas, lo que puede generar que, en situaciones de dilatación o contracción, estas juntas modifiquen su tamaño y, dependiendo de la base del patrón de forma en donde están colocadas (especialmente en el cóncavo), las teselas podrían solaparse o quedar expuestas y generar diferentes tipos de anomalías. Entonces, es de suma importancia tener en cuenta la junta, ya que además de poseer una relevancia igual que la tesela de *trencadís*, como mencionaba Gaudí, puede ser un elemento que sirva como generador de anomalías o que por el contrario ayude a evitarlas.


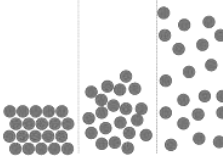
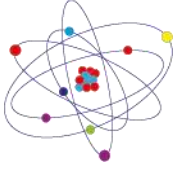


Dentro del apartado en donde se explican los condicionantes para la clasificación taxonómica⁸² se señaló que, para ejecutar los diferentes patrones de colocación, se puede proceder de dos maneras diferentes: prefabricado o esculpido (manual). El acabado dependerá en cada caso del picapedrero y del colocador de las teselas de *trencadís*. La manera ideal de actuación para realizar un correcto patrón de forma mediante el método de prefabricado es asegurarse de que los moldes sean de fácil retirado y que, sobre todo, no se adhieran a la superficie de la base. También se debe evitar que se produzcan burbujas de aire durante el vaciado del mortero o huecos que faciliten en el futuro la entrada de agentes contaminantes. En el caso del tallado en piedra, éste se debería esculpir con la forma lo más precisa posible y que el mortero sirva simplemente como fijación y no para dar la forma. Como se puede observar en las fichas de recopilación de anomalías en servicio (FPS), esculpir la piedra y dar la forma con el mortero ha generado a menudo más lesiones sobre el revestimiento de *trencadís* debido a la interacción entre la piedra rígida, el mortero elástico y el patrón de la forma. Es importante detallar estas

⁸² Apartado 4.3, sección 4.3.1.2

características, ya que será muy útil a la hora de interpretar y de realizar la descripción de los diferentes patrones de colocación en servicio, pues entre los diferentes patrones de forma, existe una variación en cuanto a la manera de disposición de las teselas de *trencadís*, y esta variación tiene su razón en el momento del montaje de las teselas de *trencadís*, ya que probablemente lo realicen maestros diferentes.

También es importante señalar que es posible que se aprecie un color azul-verdoso en algunas de las teselas de *trencadís* expuestas en el pináculo de San Bernabé, debido a la pérdida de material dorado en donde el color del vidrio de protección de fondo queda expuesto. Esto se debe a que las teselas de *trencadís* en el pináculo se han colocado con el vidrio de mayor espesor hacia el mortero y, para evitar que el color gris del mortero redujera el reflejo en el brillo del material dorado, se utilizó vidrio traslúcido azul-verdoso que, además, de evitar el efecto que causa el color del mortero de base, aumenta la reflexión y el efecto óptico del brillo.

A continuación, se enumeran las diferentes acciones que pueden intervenir en la generación de las anomalías cuando el revestimiento de *trencadís* se encuentra al exterior. Las acciones las podemos englobar en 5 grupos:

Acciones que influyen en la generación de anomalías en un revestimiento de <i>trencadís</i> al exterior		
Tipo de acción	logotipo	Descripción
Ambientales		Se trata de todas las acciones que son derivadas de los efectos de los fenómenos ambientales: asolación, lluvia, viento
Físicas		Son todas aquellas acciones que se generan a partir de los cambios que sufre un cuerpo a raíz de los estados de la materia y su funcionamiento molecular, acciones de movimiento por el espacio y el tiempo, desarrollo y utilización de la energía y la fuerza. No se modifican sus propiedades ni su naturaleza y puede ser reversible. Dentro de ellas podemos encontrar: solidificación, fusión, vaporización, condensación, deposición, sublimación, disolución, contracción, dilatación, tensión y compresión, la reflexión, la refracción, la absorción, la gravedad.
Químicas		se trata de acciones que no son reversibles, son transformaciones permanentes en donde existe una modificación molecular. Pueden ser: Oxidación, corrosión, combustión, reducción, degradación, síntesis, desplazamiento individual, desplazamiento doble, ácido-base, desgaste (erosión)
Bióticas		Son las acciones producidas por organismos vivos como animales, plantas u hongos.
Humanas		Acciones que genera el ser humano. Dentro de estas se incluye el proceso de fabricación, los golpes voluntarios o involuntarios, entre otros.

6.4. Resumen de las anomalías a través de los diferentes procesos del vidrio metálico dorado

En el grupo de fichas FDPA se puede observar el origen y la evolución de las diferentes anomalías encontradas en los diversos procesos que sufre el vidrio metálico dorado desde su fabricación hasta su comportamiento en servicio.

Los gráficos se distribuyen en tres zonas de arriba abajo (A, B1/B2 y C):

La zona central, dividida en dos partes, contiene la distribución de los 4 tipos de procesos que se analizaron a lo largo de la investigación; en el nivel superior, se encuentran representadas cada una de las anomalías y su evolución desde la fabricación hasta los cien años a los que han sido expuestas las teselas de *trencadís* a la intemperie en el pináculo de San Bernabé de la Sagrada Familia y, en el nivel inferior, se encuentran los procesos desde su fabricación hasta los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio de envejecimiento acelerado.

En la figura 1.1, se observa la explicación detallada de cada una de las partes.

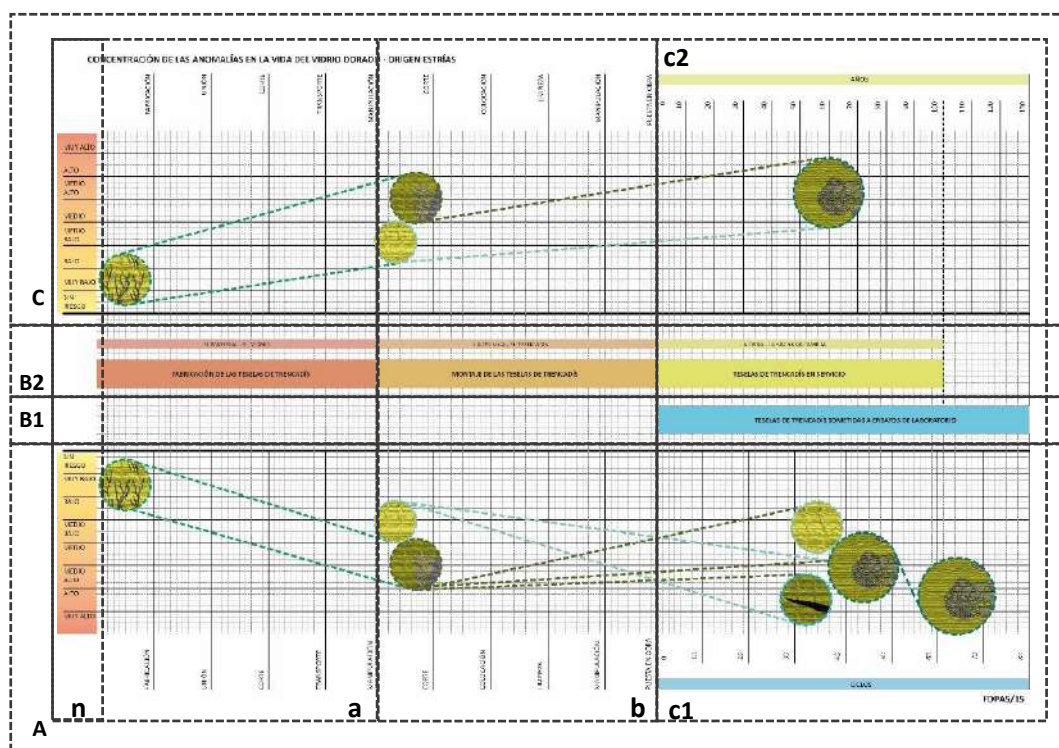


Figura 1.1 Distribución de las zonas de las gráficas

Distribución para la lectura de la tabla realizada de abajo hacia arriba:

Zona A. Corresponde a la zona del gráfico en donde se registran los resultados de las anomalías primarias, las anomalías por montaje y las anomalías resultantes de las probetas sometidas a ensayos de laboratorio de envejecimiento acelerado.

Zona n. El eje de las ordenadas corresponde a la valoración del nivel de riesgo de las diferentes anomalías. Está dividido en 8 áreas: muy alto, alto, medio alto, medio, medio bajo, bajo, muy bajo y sin riesgo. Se ubica tanto en la zona A, como en la zona C, pero con una lectura simétrica, es decir, el nivel de sin riesgo, es siempre el más próximo al eje.

Zona a. Esta zona pertenece a las diferentes etapas que se desarrollan en la fabricación y distribución del material. Se encuentra dividida en 5 partes: fabricación, unión, corte, transporte y manipulación. En el proceso de fabricación se valoran dos partes: tanto la producción del vidrio de protección como la de la lámina de pan de oro. La unión se trata del momento en el que las tres capas del vidrio metálico dorado se unen y conforman el conjunto. El corte son los diferentes procesos de corte del material después de realizada la unión. En el transporte, se valoran los procesos que tienen que ver con el desplazamiento del material desde la fábrica hasta el lugar donde se va a utilizar. La manipulación depende del cuidado y las acciones humanas que se produzcan sobre las *piastrelle*.

Zona b. Esta zona contiene los diferentes grupos de acciones que se realizan en el proceso del montaje tanto de las probetas como de los elementos prefabricados para montarlos en obra. También se valoran los procesos que corresponden con el montaje in situ. Se divide en 5 partes: corte, colocación, limpieza, manipulación y puesta en obra. El corte, muy importante en el proceso, es el momento en el cual las *piastrelle* de vidrio metálico dorado pasan a ser teselas de *trencadís* mediante los diferentes sistemas de corte. La colocación se refiere específicamente a procesos de montaje prefabricados. La limpieza es el mantenimiento posterior a la colocación y configuración de las superficies de *trencadís*. Aparece nuevamente la manipulación y, por último, la puesta en obra pertenece a todas las acciones que se realicen in situ.

Zona c1. Esta zona está distribuida en 8 partes que corresponden a los ciclos de exposición de las probetas a los ensayos de envejecimiento acelerado. Las 8 partes corresponden a la división de los 80 ciclos totales realizados cada 10 ciclos.

Zona B1. Esta zona es el área dedicada a la división de los procesos de fabricación, montaje y resultados de las pruebas de laboratorio.

Zona B2. Esta zona contiene los mismos dos primeros procesos que en la zona B1 y, el tercero, corresponde a la zona dedicada a las anomalías presente en el proceso del servicio.

Zona C. Esta zona corresponde al área del gráfico en donde se registran los resultados de las anomalías primarias, las anomalías por montaje y las anomalías concernientes al vidrio metálico dorado sometido a servicio.

Zona c2. Esta zona está distribuida en 13 espacios en donde los 10 primeros corresponden a los casi 100 años de exposición del material en el pináculo de San Bernabé. Los otros 3 son 30% extra de años que se le aumenta para hacer la equivalencia de los comportamientos del material en los ensayos realizados en laboratorio con los comportamientos en servicio.

Notas aclaratorias para la toma de decisiones:

Para los ensayos de laboratorio se hicieron 80 ciclos en donde cada ciclo se ha realizado en 3 días y medio, es decir, los 80 ciclos se finalizaron en 280 días.

Cada 10 ciclos de ensayos de envejecimiento acelerado corresponden a 15 años de exposición del producto en servicio. Esto se realiza de acuerdo con los resultados obtenidos en ambos análisis. Principalmente, se tomó esta determinación, ya que en los análisis de laboratorio entre los ciclos 32 y 48 es en donde más presentan orígenes de anomalías. El ciclo 32, que es un poco más de la tercera parte del total de los ciclos, correspondería a 50 años de servicio, es decir, casi la mitad del tiempo que llevan expuestas las teselas de *trencadís* a la intemperie en el pináculo de San Bernabé. Se hace esta equivalencia, ya que los ensayos de laboratorio se realizan bajo las peores condiciones, lo cual es muy poco probable que suceda.

Un factor importante a tener en cuenta es que la disposición de las teselas de *trencadís* de las probetas para los análisis en laboratorio y las que se albergan el pináculo de San Bernabé, son colocadas de diferentes maneras. En la torre de San Bernabé, Gaudí decidió usar el vidrio de protección de menor espesor hacia el exterior, es decir, en colocación anterior. Por el contrario, a partir del 2011-12, las teselas de *trencadís* para las probetas y para su colocación en obra se empezaron a disponer con el vidrio de mayor espesor hacia el exterior, colocación posterior, pensando en una mayor protección del vidrio metálico dorado.

En la ficha FCAV, que agrupa las concentraciones para cada proceso, está señalada, en rojo, el área que corresponde al espacio entre los ciclos 32 y 48, en donde el primer valor sería la durabilidad mínima del material y el segundo, marca el momento en el cual el material empieza a sufrir daños mayores, casi su estado límite. Si se traslada a la escala de servicio, se podría decir que a partir de los 48-50 años las teselas empiezan a sufrir la mayoría de las anomalías, pero a partir de los 80-82 años, las anomalías de mayor gravedad aparecen y piden algún tipo de actuación. Cabe aclarar que las tablas son el resultado de los análisis realizados en los diferentes capítulos, y se ha logrado dar una aproximación a la realidad, pero la dificultad en poder hacer una valoración más próxima y cercana del material en servicio puede generar un porcentaje de error. Además, las teselas de *trencadís* se montaron en las probetas sobre superficies verticales planas, mientras que, en servicio, se han montado siguiendo diferentes patrones de colocación.

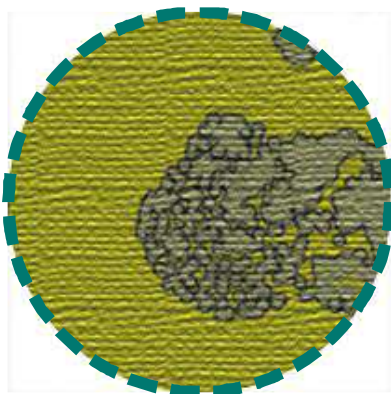


Figura 1.2 Ejemplo de representación de anomalía

Las anomalías, vienen representadas por esquemas ilustrativos y, además, están contorneadas por una línea de color. Cada anomalía tiene una línea de color que corresponde a una gama. Hay tres gamas, que indican la capa del vidrio metálico dorado que se está afectando.

- La gama de colores marrones y violetas significa que la anomalía afecta las capas superficiales de alguno de los vidrios de protección.
- La gama de colores de tonalidades verde-azules se trata de la afectación del material dorado o de alguna de las capas interiores.
- Y, por último, los colores rojos, anaranjados y amarillos son anomalías que atacan a toda la estructura del vidrio metálico dorado o al mortero.

Nota aclaratoria de los gráficos:

En los análisis de laboratorio en el capítulo 4.2, aparecen reflejados tres tipos de vidrio. Para los gráficos se utilizaron únicamente los resultados del vidrio de ORSONI, ya que es el que ha sido utilizado en los diferentes momentos, incluso en servicio. Por esta razón, algunas anomalías que aparecen en el citado capítulo no aparecen reflejadas.

7. Conclusiones

- Todos los procesos por los cuales pasa el vidrio metálico dorado tienen la misma importancia para su adecuada durabilidad y deben ser realizados de la mejor manera.
- Entre mejor sea el tratamiento del producto en sus fases iniciales, la aparición de anomalías futuras se pospondrá en el tiempo y su impacto se reducirá.
- Aunque todas las fases por las que pasa el producto son importantes, la fase de corte y de colocación son en las que más se debe tener cuidado y las que más capacidad existe de mejora porque dependen directamente de las personas implicadas.
- Hay que evitar ejercer mucha tensión sobre la lámina de pan de oro, por lo cual sería aconsejable buscar un método alternativo en el cual realizar un corte en el que no se afecte demasiado la estructura del pan de oro.
- Cada uno de los métodos de montaje en obra (prefabricado o manual) tiene sus pros y sus contras, dependiendo del cuidado y la técnica con que se realicen.
- Cuando se realiza el montaje mediante el procedimiento de prefabricado (negativo), se deben evitar dejar huecos (coqueras o burbujas) en el encuentro que se crea entre las juntas del mortero y los bordes de las teselas de *trencadís*, ya que de otra forma se facilita la implantación de agentes atacantes.
- Los moldes de prefabricado deben de estar diseñados para evitar que sus paredes afecten la superficie del vidrio metálico dorado. En la técnica manual (positivo), se deben colocar las teselas guardando una buena proporción con la dimensión de la junta de mortero, para proveer una mayor capacidad de absorción de movimientos en caso de dilataciones o concentraciones del material.
- Como resultado comparativo entre las dos posiciones de montaje de las teselas de *trencadís*, la colocación en positivo resulta ser la más conveniente para la durabilidad, pues la mayoría de las anomalías de mayor gravedad provienen del interior del revestimiento, es decir desde el mortero.
- Si se volviera a retomar la colocación anterior (vidrio de mayor espesor en la base), se podría retomar el uso del vidrio de color azul-verdoso en fondo lo que aumentaría considerablemente la durabilidad del material ya que es un vidrio más resistente. Al colocar el vidrio con la colocación posterior, el vidrio de mayor espesor quedaría expuesto a la intemperie y el vidrio de menor espesor en la base, por lo que, como se observó en los resultados de las pruebas de las probetas expuestas al ensayo de laboratorio de cristalización de sales, las sales, al entrar entre las capas de los dos vidrios, realizan un desprendimiento del conjunto lo que conlleva la pérdida del vidrio de mayor espesor y, éste, al llevarse un gran porcentaje de la estructura del vidrio metálico dorado, se podría decir que corresponde a una pérdida total de la tesela.
- El mejor y el más fiable procedimiento para realizar un análisis es sobre las teselas expuestas en servicio, es decir, las que están colocadas en los pináculos. Sin embargo,

es el trabajo más dificultoso y con resultados menos precisos debido a que las teselas de *trencadís* son de difícil acceso por su ubicación en altura, por lo que la valoración se realiza sobre fotografías que pueden inducir a una mala interpretación por efectos reflejados. Además, no se posee suficiente información del registro histórico del comportamiento del material.

- Existen muchas técnicas para poder hacer una valoración química y física precisa de los vidrios históricos. No obstante, se trata de técnicas muy costosas y en la mayoría son destructivas, ya que se debe extraer una muestra para realizar los análisis.
- Aunque los resultados obtenidos mediante el análisis de las probetas sometidas a los ensayos de envejecimiento acelerado aportan muchísima información, las probetas se deberían realizar siguiendo los patrones de colocación históricos, ya que los resultados obtenidos del análisis de las teselas de *trencadís* en servicio muestran anomalías que deberían haber aparecido en las probetas sometidas en laboratorio y, sin embargo, no aparecen.
- Las características del vidrio metálico dorado son más parecidas a las de los espejos de vidrio que a las de la cerámica. Por tanto, los ensayos de laboratorio deberían realizarse sobre la normativa que rige para los espejos. A pesar de ello, la norma para espejos no comporta muchos procedimientos que se deberían valorar en el caso del vidrio dorado; por lo cual, los ensayos deberían hacerse probablemente sobre las dos normativas (para cerámica y espejos).
- Al analizar los resultados de diferentes vidrios sometidos a pruebas de laboratorio, las teselas de vidrio metálico dorado de ORSONI son las que mejor se han comportado incluso en el caso que los productos alternativos habían sido tratados con un líquido protector de superficie. El dorado es de mucha mejor calidad, además de la riqueza que aportan sus característicos contrastes de brillo y sombra, su degradación se realiza de una forma más lenta.
- A través de todos los análisis realizados, se ha logrado llegar a una hipotética duración de las teselas del revestimiento de *trencadís* con vidrio metálico dorado, en donde, a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, se determina un ciclo de inicio de anomalías menores y un límite en donde empiezan a aparecer anomalías de riesgo. En los ensayos de laboratorio el primero corresponde al ciclo 32 y el segundo al ciclo 48. Haciendo la equivalencia valorada en el apartado 4.4, en tiempo real, el primer valor correspondería a casi 50 años y el límite sería a los 80 años. Como oportunidades futuras, se podría partir de esta base, a lo cual habría que introducirle diferentes variables como la cantidad de agentes minerales que transporta el aire en el lugar donde se vaya a utilizar el vidrio metálico dorado, la salinidad y la cercanía a la superficie del mar, la velocidad del viento, la temperatura y la incidencia del sol.

8. Futuras líneas de investigación

Este estudio preliminar sobre el vidrio metálico dorado ha sido abordado desde diferentes aspectos:

- Caracterización química y física del producto
- Comportamiento del revestimiento en condiciones controladas de laboratorio
- Comportamiento del revestimiento en condiciones reales de exposición de acuerdo con los patrones usuales de puesta en obra.

Por lo que respecta al primer aspecto, quedan aún preguntas por contestar en lo que se refiere a la estanqueidad de los bordes tras el *trencadís* y al comportamiento comparado de los dos vidrios asimétricos. Ello abriría la puerta al uso de tratamientos de protección aplicados previo a su puesta en obra.

En el vidrio metálico dorado, al tratarse de un vidrio compuesto, se podrían valorar diferentes opciones mediante las cuales poder depositar el oro o cualquier metal, en el interior de las capas de una manera diferente a como se viene haciendo hasta el momento a través de la disposición de una hoja de pan de oro.

Por lo que respecta al segundo aspecto quedan aún preguntas por contestar sobre la circulación del agua dentro del revestimiento de *trencadís* y la interacción mutua en la interface vidrio-mortero de cemento. Ello abriría la puerta al uso de productos de protección, nuevas técnicas de corte del vidrio o morteros menos agresivos con el vidrio.

La técnica del *trencadís* también abre muchas posibilidades de actuación, en donde el principal objetivo que se debe buscar es la mejora de la técnica de corte de las *piastrelle* de vidrio metálico dorado para generar las teselas, con el fin de afectar lo mínimo posible a las diferentes capas que componen al producto, pero sin perder su característica de corte irregular que aporta adherencia lateral de las teselas con el mortero de base. También, se abren líneas futuras en donde poder mejorar la prefabricación de los elementos para limitar al máximo la aparición de anomalías.

Por lo que respecta al tercer aspecto, quedan aún preguntas por contestar sobre la influencia de la forma y orientación del revestimiento, así como las condiciones específicas de exposición. Ello abriría la puerta a técnicas para asegurar la mejor evacuación del agua de lluvia o evitar la deposición de agentes contaminantes.

Todo ello para progresar en el conocimiento de una técnica constructiva que puede ser de gran impacto en la construcción futura.

9. Bibliografía

AENOR. (2009). Norma española. *UNE-EN 1036. Vidrio para la edificación. Espejos de vidrio recubiertos de plata para uso interno*. Madrid, España: AENOR.

AENOR. (2015). Norma española. *UNE-EN ISO 10545. Baldosas cerámicas*. Madrid, España: AENOR.

Alegría, Pedro. Artículo. *Las cónicas y sus aplicaciones*. España: Universidad del País Vasco. Obtenido de www.ehu.eus en septiembre de 2009.

Alsina, C. (2002). *Gaudí. La búsqueda de la forma. Macla de geometrías*. Barcelona, España: Lunwerg Editores.

APPLUS. (2018). 18/16216-3319. Bellaterra. (no publicado)

Arias Holguin-Veras, P.; Zamora i Mestre, J. (2018). *Evaluación de las características cromáticas del vidrio de Murano utilizado en revestimientos exteriores en trencadís*. Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heitage Management. Congreso llevado en Caceres, España.

ARPAV. (2014). Informe. *Vetriere di Murano. Simulazione modellistica di disppersione in atmosfera degli inquinanti rilasciati durante le attività di lavorazione del vetro*. Venecia, Italia.

Artigas, I. (2007). *Gaudí. Complete works. 1900-1926*. Köln, Alemania: TASCHEN GmnH.

Àvila Casademont, G. (2015). Tesis doctoral. *Geometria i forma dels pinacles de la Sagrada Família, d'Antoni Gaudí*. Sant Cugat, España: Universidad Politécnica de Cataluña.

Barovier Mentasti, R. (1988). *Vidre Murano avui*. Barcelona, España: Trevisanstamp.

Bonet i Armengol, J. (2007). *Gaudí Unseen. The relationship between the Sagrada Família and other works by Gaudí*. Berlín, Alemania: Jovis Verlag.

Bonet I Armengol, J. (2000). *Temple Sagrada Família*. Barcelona, España: EDITORIAL ESCUDO DE ORO S. A.

Carandell, J. M. (2004). *El templo de la Sagrada Família*. Barcelona, España: TRIANGLE POSTALS.

Coll, I.; Fajula, F.; Serrallonga, J. (Junio 2019). Asistencia al Curso Intensivo de la Setmana Gaudí. FACULTAT ANTONI GAUDÍ, ATENEO UNIVERSITARI SANT PACIÀ.

Dal Bianco, B.; Russo, U. (2011). Artículo. *Basilica of San Marco (Venice, Italy/Byzantine period): Nondestructive investigastion on the glass Mosaic Tesserae*. Journal of Non-Crystalline solids.

De la Colina Tejeda, L. (2001). Tesis doctoral. *El oro en hoja: aplicación y tratamiento sobre soportes móviles tradicionales, muro y resinas*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.

De la Plaza Escudero, L., Morales Gómez, A., Bermejo López, M. L., Martínez Murillo, J. M. (2008-2012). *Diccionario visual de términos arquitectónicos. Nueva edición ampliada*. Madrid, España: Ediciones Cátedra (Grupo Anaya S. A.).

Espel, R.; Gómez, J.; Grima, R.; Aguado, A. (2009). Informe. *La evolución de la construcción del Templo de la Sagrada Família*. Barcelona, España.

Fernández Navarro, J. M. (2003). *Textos universitarios. El vidrio*. Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones científicas; Sociedad Española de Cerámica y vidrio.

Freixa, M., Saliné, M. (2018). *Gaudí i el trencadís modernista*. Barcelona, España: Triangle Postals SL.

- GENERALITAT VALENCIANA. (2011). *Guía de la baldosa cerámica*. España: Generalitat Valenciana. Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente.
- Gómez Ramió, J. (2015). Tesis doctoral. *Los pináculos de la Sagrada Familia: restauración y obra nueva*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Hogg, S.; McPhail, D.; Oakley, V.; Rogers, P. (1999). *The Conservation of Glass and Ceramics. Modern instrumental methods for the study of the deterioration of vessel glass*. Londres, Inglaterra: Norman H. Tennent.
- Institut de promoció ceràmica. *Dilatación Térmica Lineal*. (septiembre de 2019). Obtenido de www.ipc.org.es
- Institut de promoció ceràmica. *Resistencia de la Cerámica*. (septiembre de 2019). Obtenido de www.ipc.org.es
- LiTA. (2018). *Avanç de resultats dels assajos d'envelliment accelerat a APPLUS. Revestiments de trencadís: tessel·les daurades*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- López Martínez, O. (2018). Trabajo final de grado. *Vidrio de Murano: Usos en construcción y conservación*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Mass, J. L. (1999). *The Conservation of Glass and Ceramics. Instrumental methods of analysis applied to the conservation of ancient and historic glass*. Londres, Inglaterra: Norman H. Tennent.
- MEDCLIC. Cuaderno. *El mar mediterráneo. Programa educativo sobre el Mediterráneo y su litoral*. España.
- Mezzetti, C. (1993). *Antoni Gaudì. Una proposta di libertà. Atti del convegno*. Milán, Italia: Politecnico di Milano.
- Moreno Ramón, H.; Ibáñez Asensio, S. (2018). Artículo. *Dureza de los Minerales. La Escala de Mohs*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Neri, E.; Verità, M.; Biron, I.; Guerra, M. F. (2016). Artículo. *Glass and gold: Analyses of 4th-12th centuries Levantine mosaic tesserae. A contribution to technological and chronological knowledge*. Journal of Archaeological Science.
- Perez Perez, E. (2015). Tesis de fin de master. *Aplicaciones del vidrio opalino para revestimiento de paramentos*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Rincón, J. M. (2002). Seminario. *Materias Primas para la Industria del Vidrio*. Madrid, España: Instituto E. Torroja de Ciencias de la Construcción.
- Rincón, J. R. (2005). Artículo. *Fricción y desgaste de baldosas cerámicas de gres de monococción y de gres porcelánico*. Elche, Alicante, España: Boletín de la Sociedad Española de cerámica y vidrio.
- Römich, H. (1999). *The Conservation of Glass and Ceramics. Historical glass and its interaction with the environment*. Londres, Inglaterra: Norman H. Tennent.
- Santini, A. e figlio. (MDCCCXLII). *Guida alle fabbriche vetrarie di Murano*. Venezia, Italia.
- Serra I Fabregà, R. (2014). *Caracterizació i valoració del vidre Murano de la SF*. Barcelona. Barcelona, España. (no publicado)
- Universidad Católica Argentina. (2008). Facultad Católica de Química e Ingeniería de Rosario. *Estudio y Ensayo de Materiales. VIDRIOS*. Rosario, Argentina.

- Toninato, T. (1988). *Vidre Murano avui*. Barcelona, España: Trevisanstamp.
- Turbi Mojica, M. (2015, octubre). Tesis final de máster. *Degradación acelerada en cámara climática de superficies de madera con diferentes tratamientos y comparación con la degradación natural a largo plazo*. Sant Cugat, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Valeri Manera, (1988). *Vicre Murano avui*. Barcelona, España: Trevisanstamp.
- Van Hensbergen, G. (2016). *La Sagrada Familia. El paraíso terrenal de Gaudí*. Barcelona, España: PENGUIN RANDOM HOUSE GRUPO EDITORIAL.
- Venteo, Daniel. (2015). *Sagrada Família desconeguda*. Catalunya: Editorial Efadós.
- Verità, M. (2006). Cuaderno. *Tessere vitree a foglia d'oro nei mosaici di Aquilea*. Murano-Venecia, Italia: Stazione Sperimentale del Vetro.
- Verità, M.; James, L.; Freestone, I.; Henderson, J.; Nenna, M-D.; Shibille, N. (2009). *Glossary of Mosaic Glass Terms*. Brighton, Inglaterra: University of Sussex.
- Whitehouse, D. (2006). Glass. A pocket Dictionary of terms Commonly Used to Describe Glass and Glassmaking. Nueva York, Estados Unidos: The Corning Museum of Glass.
- www.cuandovisitar.com.ar. (septiembre de 2019). Obtenido de www.cuandovisitar.com.ar
- www.orsoni.com. (mayo, junio, septiembre de 2019). Obtenido de www.orsoni.com.
- www.vitralba.com. (septiembre de 2019). Obtenido de www.vitralba.com
- Zamora i Mestre, J. L. (2017). *Campanya d'assaigs de durabilitat del revestiment de trencadís METALL80+COLOR40*. Barcelona, España. (no publicado)

10. Referencias Gráficas

10.1 Figuras y fichas utilizadas dentro del documento

Capítulo 5 – Marco Teórico

Apartado 5.1 – El Material – El vidrio

Figura 1.1. Elaboración propia

Figura 1.2. Tomado de: Universidad Católica Argentina. Facultad Católica de Química e Ingeniería de Rosario. *Estudio y Ensayo de Materiales. VIDRIOS*. Rosario, Argentina.

Figura 1.3. Tomado de: Barovier Mentasti, R. (1988)

Figura 1.4. Tomado de: FERNÁNDEZ NAVARRO, J. M. (2003)

Sección 5.1.3 – El vidrio en la isla de Murano

Figura 1.5. Tomado de: Barovier Mentasti, R. (1988)

Sección 5.1.4 – Tipos de vidrio de Murano más representativos

Figura 1.6. Imagen izquierda suministrada por: ORSONI. Derecha: imagen propia.

Sección 5.1.5 – La conservación del vidrio y las técnicas para su evaluación

Figura 1.7. Elaboración propia

Figura 1.8. Elaboración propia

Apartado 5.2 – La técnica – El trencadís

Sección 5.2.1 – Antecedentes e historia de la técnica del trencadís

Figura 1.1. Tomado de: www.italia.it

Sección 5.2.2 – El trencadís de las obras de Gaudí

Figura 1.2. Tomado de: Freixa, M., Saliné, M. (2018)

Apartado 5.3 – La Obra – La Sagrada Familia

Figura 1.1. Tomado de: Mezzetti, C. (1993)

Sección 5.3.1 – Principios utilizados en la composición de los pináculos de la Sagrada Familia

Figura 1.2. Tomado de: Alegría, Pedro. Artículo. *LAS CÓNICAS Y SUS APLICACIONES*.

Sección 5.3.2 – Partes del pináculo de San Bernabé

Figura 1.3. Tomado de: Àvila Casademont, G. (2015)

Figura 1.4. Ampliación detalles de imágenes escaneadas por técnicos de la Sagrada Familia.

Capítulo 6 – Desarrollo de la investigación

Apartado 6.1 - Análisis desde el material

Sección 6.1.1 – Material proveniente de fábrica (análisis cualitativo)

Sección 6.1.1.1 – Detalles del material del estudio

Figura 1.1. Elaboración propia

Figura 1.2. Tomado del catálogo de muestras de ORSONI

Sección 6.1.1.2 – Interpretación del proceso fabricación del vidrio dorado

Figura 1.3. Tomado de: De la Colina Tejeda, L. (2001)

Figura 1.4. Elaboración propia

Figura 1.5. Imágenes obtenidas del video de www.youtube.com: PAN DE ORO de Telantiqua Restauración de tejidos históricos

Figura 1.6. Parte de las imágenes son obtenidas del canal de www.youtube.com de ORSONI, y parte proporcionadas por la empresa.

Sección 6.1.1.3 – Primera aproximación. Análisis Visual (sin microscopio) y metodologías de análisis

Figura 1.7. Elaboración propia

Figura 1.8. Elaboración propia

Figura 1.9. Elaboración propia

Figura 1.10. Elaboración propia

Figura 1.11. Elaboración propia

Figura 1.12. Elaboración propia

Figura 1.13. Elaboración propia

Figura 1.14. Elaboración propia

Figura 1.15. Elaboración propia

Figura 1.16. Elaboración propia

Figura 1.17. Elaboración propia

Figura 1.18. Elaboración propia

Figura 1.19. Elaboración propia

Figura 1.20. Elaboración propia

Figura 1.21. Elaboración propia

Figura 1.22. Elaboración propia

Sección 6.1.1.4 – Análisis visual-instrumental bajo microscopio

Figura 1.23. Elaboración propia

Figura 1.24. Elaboración propia

Sección 6.1.1.4.1 – Anomalías entre capas o en la lámina de pan de oro

Figura 1.25. Elaboración propia

Figura 1.26. Elaboración propia

Figura 1.27. Elaboración propia

Figura 1.28. Elaboración propia

Figura 1.29. Elaboración propia

Figura 1.30. Elaboración propia

Figura 1.31. Elaboración propia

Figura 1.32. Elaboración propia

Figura 1.33. Elaboración propia

Figura 1.34. Elaboración propia

Figura 1.35. Elaboración propia

Figura 1.36. Elaboración propia

Figura 1.37. Elaboración propia

Sección 6.1.1.4.2 – Anomalías en las caras exteriores de vidrios de protección

Figura 1.38. Elaboración propia

Figura 1.39. Elaboración propia

Figura 1.40. Elaboración propia

Figura 1.41. Elaboración propia

Figura 1.42. Elaboración propia

Figura 1.43. Elaboración propia

Figura 1.44. Elaboración propia

Figura 1.45. Elaboración propia

Sección 6.1.2 – *Piastrelle* sometidas a ensayos básicos de laboratorio (análisis cuantitativo)

Ficha 1.1. Información tomada de: GENERALITAT VALENCIANA. (2011)

Ficha 1.2. Información tomada de: GENERALITAT VALENCIANA. (2011)

Sección 6.1.2.1 – Ensayo para la determinación de la absorción de agua, porosidad abierta, densidad relativa y densidad aparente. UNE-EN ISO 10545-3:2018

Ficha 1.3. Información tomada de: APPLUS. (2018)

Ficha 1.4. Ampliación de ficha 1.2: GENERALITAT VALENCIANA. (2011)

Sección 6.1.2.2 – Ensayo para determinar la resistencia a flexión y la carga de rotura. UNE-EN ISO 10545-4:2015

Ficha 1.5. Información tomada de: APPLUS. (2018)

Ficha 1.6. Ampliación de ficha 1.2: GENERALITAT VALENCIANA. (2011)

Sección 6.1.2.3 – Ensayo para determinar la resistencia química. UNE-EN ISO 10545-13:2017

Ficha 1.7. Información tomada de: APPLUS. (2018)

Ficha 1.8. Información tomada de: APPLUS. (2018)

Ficha 1.9. Información tomada de: APPLUS. (2018)

Ficha 1.10. Información tomada de: APPLUS. (2018)

Figura 1.1. Elaboración propia

Sección 6.1.2.4 – Ensayo para determinar la resistencia a las manchas. UNE-EN ISO 10545-14:2015

Ficha 1.11. Información tomada de: APPLUS. (2018)

Ficha 1.12. Información tomada de: APPLUS. (2018)

Ficha 1.13. Información tomada de: APPLUS. (2018)

Sección 6.1.2.5 – Ensayo para determinar la resistencia a choque térmico. UNE-EN ISO 10545-9:2013

Ficha 1.14. Información tomada de: APPLUS. (2018)

Figura 1.2. Tomada de: APPLUS. (2018)

Figura 1.3. Tomada de: APPLUS. (2018)

Sección 6.1.2.6 – Ensayo para determinar la resistencia a la abrasión superficial. UNE-EN ISO 10545-7:21999

Ficha 1.15. Ampliación de ficha 1.2: GENERALITAT VALENCIANA. (2011)

Ficha 1.16. Ampliación de ficha 1.2: GENERALITAT VALENCIANA. (2011)

Figura 1.4. Tomado de: Hogg, S.; McPhail, D.; Oakley, V.; Rogers, P. (1999)

Sección 6.1.2.7 – Ensayo para determinar la resistencia al rayado según Mohs. UNE 67101:1985 y 67101/1M:1992

Ficha 1.17. Información tomada de: Moreno Ramón, H.; Ibáñez Asensio, S. Artículo.

Ficha 1.18. Información tomada de: APPLUS. (2018)

Sección 6.1.2.8 – Ensayo para determinar la resistencia al rayado según Mohs. UNE 67101:1985 y 67101/1M:1992

Ficha 1.19. Información tomada de: APPLUS. (2018)

Ficha 1.20. Información tomada de: APPLUS. (2018)

Apartado 6.2 - Análisis desde el Laboratorio (experimentación – simulación)

Sección 6.2.1 – Metodologías más comunes para la realización de experimentaciones

Figura 1.1. Elaboración propia

Ficha 1.1. Datos tomados de: Römich, H. (1999)

Figura 1.2. Tomado de: Römich, H. (1999)

Figura 1.3. Tomado de: Römich, H. (1999)

Figura 1.4. Tomado de: www.cuandovisitar.com.ar

Figura 1.5. Tomado de: www.cuandovisitar.com.ar

Sección 6.2.2 – Patrones de deterioro obtenidos de los ensayos de laboratorio

Sección 6.2.2.1 – Proceso de montaje y metodología para la valoración de las probetas sometidas a ensayos de laboratorio

Figura 1.1. Elaboración propia

Figura 1.2. Imágenes suministradas por el Dr. Arquitecto Joan Zamora

Sección 6.2.2.1.1 – Montaje de las probetas de *trencadís* con vidrio dorado

Figuras 1.3, 1.4 y 1.5. Imágenes tomadas del video: El *trencadís*, marca Gaudí de la cuenta de www.youtube.com de la basílica de la Sagrada Família

Figura 1.6. Imágenes suministradas por el Dr. Arq. Joan Lluís Zamora

Figura 1.7. Elaboración propia

Figura 1.8. Elaboración propia

Figura 1.9. Elaboración propia

Sección 6.2.2.1.2 – Metodología para la valoración

Figura 1.10. Elaboración propia

Figura 1.11. Elaboración propia

Ficha 1.1. Elaboración propia

Sección 6.2.2.2 – Ensayos de envejecimiento acelerado en laboratorio

Ficha 1.1. Elaboración propia

Ficha 1.2. Elaboración propia

Figura 1.2. Elaboración propia

Figura 1.3. Elaboración propia

Figura 1.4. Elaboración propia

Figura 1.5. Elaboración propia

Figura 1.6. Elaboración propia

Figura 1.7. Elaboración propia

Figura 1.8. Elaboración propia

Figura 1.9. Elaboración propia

Figura 1.10. Elaboración propia

Figura 1.11. Elaboración propia

Figura 1.12. Elaboración propia

Figura 1.13. Elaboración propia

Figura 1.14. Elaboración propia

Figura 1.15. Elaboración propia

Figura 1.16. Elaboración propia

Figura 1.18. Elaboración propia

Figura 1.19. Elaboración propia

Figura 1.20. Elaboración propia

Figura 1.21. Elaboración propia

Figura 1.22. Elaboración propia

Figura 1.23. Elaboración propia

Figura 1.24. Elaboración propia

Figura 1.25. Elaboración propia

Figura 1.26. Elaboración propia

Figura 1.27. Elaboración propia

Figura 1.28. Elaboración propia

Figura 1.29. Elaboración propia

Figura 1.30. Elaboración propia

Figura 1.31. Elaboración propia

Figura 1.32. Elaboración propia

Figura 1.33. Elaboración propia

Figura 1.34. Elaboración propia

Figura 1.35. Elaboración propia

Figura 1.36. Elaboración propia

Figura 1.37. Elaboración propia

Figura 1.38. Elaboración propia

Apartado 6.3 - Análisis desde la obra

Figura 1.1. Tomado de: Gómez Ramió, J. (2015)

Sección 6.3.1 – Patrones de colocación

Sección 6.3.1.1 – El pináculo de San Bernabé

Figura 1.2. Imágenes tomadas de: Àvila Casademont, G. (2015)

Figura 1.3. Elaboración propia sobre escaneado realizado por técnicos de la Sagrada Familia.

Figura 1.4. Elaboración propia sobre escaneado realizado por técnicos de la Sagrada Familia.

Sección 6.3.1.2 – Taxonomía de clasificación para la valoración de los patrones de colocación

Figura 1.1. Elaboración propia

Figura 1.2. Elaboración propia

Figura 1.3. Elaboración propia

Figura 1.4. Elaboración propia

Figura 1.5. Elaboración propia

Figura 1.6. Elaboración propia

Figura 1.7. Elaboración propia

Figura 1.8. Elaboración propia

Apartado 6.4 - Resumen de las anomalías a través de los diferentes procesos del vidrio dorado

Figura 1.1. Elaboración propia

Figura 1.2. Elaboración propia

10.2 Figuras y fichas utilizadas en los grupos de Fichas incluidas en el capítulo 11.

Capítulo 5 – Marco Teórico

Apartado 5.1 – El Material – El vidrio

Grupo de fichas **FTVM** – Tipos de Vidrio de Murano

Imágenes tomadas del Catálogo de las colecciones de la Fondazione Musei Civici Venezia (MUVE). www.archiviodelacomunicazione.it:

Avventurina, calcedonio, filigrana, granzoli, incalmo, vetro a cammeo, corinto, vetro a fiamma, vetro a fondo oro graffito, granito, incamiciato, opale, vetro a piume, vetro a ghiaccio.

Smalto tomado de: www.orsoni.com

Murrine tomado de: www.mademurnoglass.com

Apartado 5.2 – La técnica – El trencadís

Grupo de fichas **FTO** – Tipos de Opus

Imágenes tomadas de: De la Plaza Escudero, L., Morales Gómez, A., Bermejo López, M. L., Martínez Murillo, J. M. (2008-2012)

Grupo de Fichas **FETG** – Evolución del trencadís en la obra de Gaudí

Imagen de los Pabellones Güell: Imagen propia

Imagen del Palau Güell tomada de: Alsina, C. (2002) y Freixa, M., Saliné, M. (2018)

Imagen de la Torre de Bellesguard tomada de: www.portalgaudi.cat

Imágenes del Park Güell y de la Iglesia de la Colonia Güell tomadas de: Freixa, M., Saliné, M. (2018)

Imágenes de la Casa Batlló, de la Casa Milà tomadas de: Artigas, I. (2007)

Imagen de los pináculos de la Sagrada Familia tomados de: Alsina, C. (2002)

Ficha **FPVD** – Proyectos realizados con vidrio dorado

Imágenes de la Basílica de San Apolinar y de la Basílica de San vital, tomadas de: www.ravennamosaici.it

Imagen de la Basílica de Santa Sofia tomada de: www.hagiasophiatrkey.com

Imagen de la Cúpula de la Roca de Jerusalén tomada de: www.escurasy monumentos.com

Imagen de la Mezquita de Córdoba tomada de: www.mezquita-catedraldecordoba.es

Imágenes de la Basílica de San Marcos tomada de: www.wga.hu

Imagen de la Sagrada Familia tomada de: Bonet I Armengol, J. (2000)

Imagen de la Basílica del Santuario de la Inmaculada Concepción tomada de: www.orsoni.com

Imagen del Academy Museum of Motion Pictures tomada de: www.orsoni.com

Imagen de la Catedral Ortodoxa de Bucarest tomada de: www.orsoni.com

Capítulo 6 – Desarrollo de la investigación

Apartado 6.1 - Análisis desde el material

Grupo de Fichas **FAP** – Anomalías Primarias. Elaboración propia

Apartado 6.2 - Análisis desde el Laboratorio (experimentación – simulación)

Grupo de Fichas **FAM** – Anomalías de Montaje. Elaboración propia

Grupo de Fichas **FAL** – Anomalías de Laboratorio. Elaboración propia

Apartado 6.3 - Análisis desde la obra

Grupo de Fichas **FAS** – Anomalías en Servicio. Elaboración propia

Grupo de Fichas **FPC** – Anomalías Patrones de Colocación. Elaboración propia

Apartado 6.4 - Resumen de las anomalías a través de los diferentes procesos del vidrio dorado

Grupo de Fichas **FCAV** – Concentración de Anomalías en la Vida del vidrio dorado. Elaboración propia

Grupo de Fichas **FDPA** – Desarrollo de Patrones de Anomalías. Elaboración propia

Grupo de Fichas **LFPA** – Leyenda Fichas Procesos de Anomalías. Elaboración propia

11. Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a todas las personas, empresas y grupos implicados profesionalmente en esta investigación sin los cuales no habría sido posible lograr el desarrollo para este trabajo final de máster ni llegar a los resultados obtenidos.

A la primera persona que quiero agradecer para el desarrollo de esta investigación es a mi tutor el Dr. Joan Lluís Zamora i Mestre, el cual me ha orientado de una manera amena, agradable y apasionada. Le agradezco el esfuerzo, el conocimiento y las herramientas que ha puesto a mi alcance para cada paso de esta investigación. En la misma medida agradezco a mi co-tutora la Dra. Júlia Gómez Ramió, por sus comentarios, opiniones y, además, por abrir el campo de esta investigación con el desarrollo de su tesis doctoral cuyo objeto han sido los pináculos de la Sagrada Familia. Para el desarrollo de la clasificación taxonómica de uno de los capítulos de la investigación, quiero agradecer a la Dra. Cristina Pardal por su opiniones y sugerencias. También agradezco a la doctoranda Paloma Arias Holguin-Veras, quien se encuentra realizando una investigación sobre la utilización el vidrio *smalti* en la técnica del *trencadís*, quien abrió camino al desarrollo de mi investigación.

El avance de la presente investigación no hubiera sido posible sin la colaboración de algunos grupos que me han acercado a la realidad del producto. Muchas gracias a la Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família por la información proporcionada, a sus profesionales en la resolución de algunas dudas y al trabajo que se realiza junto al Grupo de Investigación LiTa (Laboratori d'Innovació i Tecnologia a l'Arquitectura) de la Universitat Politècnica de Catalunya. Este trabajo conjunto, ha aportado muchísima información valiosa para el conocimiento del tema desarrollado. En esta misma línea, agradezco a la empresa APPLUS+, por los resultados proporcionados de las diferentes pruebas de laboratorio que se han realizado sobre el producto, así como de la posibilidad de acceso a sus instalaciones para observar el proceso en los diferentes tratamientos.

Agradecimientos especiales a las empresas de vidrio: Orsoni, Vidalglass y Ariño Duglass porque de alguna u otra manera han aportado al conocimiento del producto.

Reconocimiento y evaluación de la calidad del Vidrio Metálico Dorado de Murano usado como revestimiento exterior con la técnica del *trencadís* en la arquitectura modernista catalana. Patrones de alteración y su efecto en la durabilidad.

TFM / Héctor Yuldor Orozco Camargo / MArch / Innovación tecnológica / 2019



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH